Marzo 2022 · nº 546 · 6,50 €

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

ASTRONOMÍA EN EL MUNDO ANTIGUO

Nuevas claves sobre el mecanismo de Anticitera



EVOLUCIÓN
Los primeros sonidos animales

FÍSICA CUÁNTICA
Cómo poner a prueba la mecánica bohmiana

BIOLOGÍA CELULAR
Una visión más detallada del interior de las células

SUMARIO

ARTÍCULOS

SECCIONES



El ADN presente en el aire puede ser especialmente útil para identificar insectos como las polillas.

VMENSHOV/GETTY IMAGES

GENÉTICA

BIODIVERSIDAD ESCONDIDA EN EL AIRE

El análisis del ADN ambiental podría utilizarse para identificar los insectos que viven a nuestro alrededor

Hace dos décadas, biólogos e historiadores de la naturaleza de todo el mundo emprendieron ambiciosos proyectos para crear inventarios de la biodiversidad de nuestro planeta. Después de todo, sostenían, no se puede salvar lo que no se sabe que existe. Incluso las estimaciones más optimistas indican que la ciencia solo ha descrito una cuarta parte de las especies de la Tierra, lo que genera preocupaciones sobre su situación general en medio de las crecientes tasas de extinción.

Estos proyectos han avanzado con lentitud debido al minucioso trabajo que implica la recopilación y descripción de las especies, así como la secuenciación del ADN de muestras de organismos. Ahora ha surgido una nueva línea de investigación para clasificar los animales desconocidos de la Tierra: la extracción del ADN del aire que nos rodea.

La técnica es una variación de otra utilizada para analizar el agua, el suelo y otros entornos, y consiste en recoger y secuenciar el ADN ambiental (ADNa), el material genético de las células que desprenden las especies. El ADNa extraído del aire podría proporcionar una imagen de los habitantes de un lugar. También puede resultar especialmente útil para identificar organismos como los insectos, que son notoriamente difíciles de controlar (y a menudo se matan con las técnicas tradicionales de secuenciación del ADN). El análisis del ADNa es más rápido y menos costoso que el muestreo y la secuenciación de animales enteros, y permite obtener datos de muchas especies a la vez, incluso en entornos de difícil acceso.

En dos nuevos estudios publicados en *Current Biology* se ha puesto a prueba el método. Un grupo de investigadores trabajó con él en el zoo de Copenhague y otro en el parque zoológico de Hamerton (Reino Unido), lugares perfectos para evaluarlo porque los científicos sabían exactamente qué especies estaban presentes y cuántos individuos había de cada una de ellas.

Los dos grupos utilizaron diferentes métodos para aspirar o insuflar aire a través de un filtro y extraer así el ADN. Tras amplificarlo y secuenciarlo, lograron identificar muchas de las especies presentes en el zoo, incluso las que se hallaban en el interior de edificios o a cientos de metros de los lugares de muestreo.

En el ADNa también se observaron rastros genéticos de especies que se encontraban fuera del recinto de los zoológicos. De esta manera, el grupo del Reino Unido identificó erizos comunes, que están en peligro de extinción en el país, y el grupo de Dinamarca, ardillas y gatos.

Los investigadores afirman que el ADNa cambia las reglas del juego del estudio de la biodiversidad. Las otras técnicas exigen que el animal esté físicamente presente. «Si se trabaja con una cámara trampa, es necesario que los animales pasen por delante de ella, porque si pasan por detrás, nunca se sabrá de ellos», explica Elizabeth Clare, ecóloga molecular de la Universidad de York y coautora del estudio del Reino Unido. «Si se hace un registro acústico o un estudio visual, el animal tiene que estar allí. En cambio, el ADN ambiental se asemeja a una huella. Se trata de un tipo de datos esencialmente diferente. El animal no tiene que estar presente, por lo que es mucho más probable detectar organismos muy infrecuentes.»

Un estudio demostrativo preliminar sobre el ADNa, presentado en la conferencia «Ecología a través de las fronteras», empleó técnicas similares para identificar insectos a partir de muestras de aire de tres lugares del sur de Suecia. El conservacionista Fabian Roger y sus colaboradores de la Universidad de Lund hallaron rastros de ADN que atribuyeron a 85 especies, entre ellas mariposas, escarabajos, hormigas y moscas, así como a nueve especies que no eran insectos, como ranas y aves. Al compararlo

con los resultados de un estudio clásico, el método del ADNa pasó por alto algunas especies, pero identificó otras que no había detectado.

Roger, que ahora trabaja en la Escuela Politécnica Federal de Zúrich, afirma que se animó a probar el muestreo de ADNa del aire después de buscar nuevas especies en ecosistemas acuáticos. «Me di cuenta de lo difícil que era obtener buenos datos sobre las poblaciones», comenta. «Y considerando que las investigaciones recientes muestran una reducción del 70 por ciento en la biomasa de los insectos, tenemos una falta de datos fundamental.»

Los investigadores calculan que solo se ha descrito un millón de los 5,5 millones de especies de insectos que hay en el mundo, por lo que examinar el aire para conocer la biodiversidad representa un avance emocionante que podría acelerar los esfuerzos de conservación. «Ha llegado el momento de que el ADN ambiental asuma este nuevo papel», afirma Kristine Bohmann, ecóloga de la Universidad de Copenhague y coautora del estudio de Dinamarca. Añade que ella ha examinado el ADNa de muestras fecales, mientras que otros han analizado el suelo y el agua; incluso se ha trabajado con flores para descubrir qué especies polinizadoras se han posado en ellas.

Todavía quedan por resolver algunas cuestiones sobre el método. Por un lado, no está claro cuánto tiempo persiste el material genético en el aire. ¿Detectan los investigadores una presencia reciente o una de meses antes? Los estudios han identificado ADN intacto en el permafrost hasta 10.000 años después de que los organismos a los que pertenecía hubieran desaparecido. En cambio, en otras condiciones, como la exposición a la radiación ultravioleta del sol, el ADN puede degradarse rápidamente.

Otro gran interrogante guarda relación con la abundancia de los organismos. ¿Que haya una mayor señal de ADN de una especie indica que hay muchos individuos de ella en el entorno, o simplemente se debe a que se halla más cerca del lugar de muestreo? Este es uno de los temas más candentes en la investigación del ADNa, apunta Clare. «La respuesta clara a esa pregunta es no», añade. «No es posible conocer la abundancia a menos que se tengan condiciones extremadamente controladas.»

Aun así, las implicaciones de utilizar el ADNa del aire para estudiar de forma remota la biodiversidad son enormes. Según los investigadores, una red mundial de estaciones de recolección aérea podría informar a los agricultores sobre la llegada de especies invasoras en sus zonas o a los conservacionistas si un ave en peligro de extinción sigue viviendo en una zona concreta. También permitiría obtener una instantánea de lo que hay en un lugar, de forma más rápida y barata, sin tener que hacer una laboriosa recogida de muestras en zonas de difícil acceso. En una ocasión, Bohmann recorrió Madagascar para atrapar sanguijuelas, y más tarde analizó el ADN de su estómago para conocer a los habitantes del bosque. «Si pudiera evitar exponerme a ellas y recibir los datos en mi ordenador, sería increíble», concluye.

Katherine Gammon

COGNICIÓN ANIMAL

MEMORIA DE AVE

Las palomas recuerdan el camino de vuelta a casa años después

Las palomas mensajeras combinan una precisa brújula interna con el recuerdo de los hitos del paisaje para trazar el camino de vuelta al palomar, aunque hayan transcurrido cuatro años desde la última vez que lo recorrieron, según un nuevo estudio.

Estudiar la retentiva en los animales plantea no pocos problemas; en este tipo de estudios «no es nada habitual que pasen años desde que el animal retiene la información hasta que vuelve a recordarla por necesidad», explica Dora Biro. En un estudio publicado en *Proceedings of the Royal Society B*, esta zoólo-

ga de la Universidad de Oxford comparó con la ayuda de sus colaboradores los trayectos recorridos por palomas mensajeras domésticas tres o cuatro años después de que volaran esa misma ruta hasta su palomar desde una granja situada a 8,6 kilómetros. El estudio aprovecha los datos de otro experimento hecho en 2016, en el que estas aves aprendieron las rutas en contextos sociales distintos durante varios vuelos: solas o acompañadas por congéneres que conocían o ignoraban el camino.

Con los datos de los aparatos de GPS fijados temporalmente a su dorso, compararon las trayectorias de vuelo de una cohorte de palomas en 2016 con las rutas tomadas por las mismas aves en 2019 o 2020, sin que estas hubiesen visitado el lugar de suelta en todo ese tiempo. Algunas no usaron algunos puntos de referencia del terreno en su recorrido, pero muchas otras siguieron caminos «sorprendentemente similares» a los de 2016, afirma la también zoóloga de Oxford y coautora del estudio Julien Collet. «Era como… si hubiesen volado por última vez justo ayer, no hace cuatro años.»

El equipo comprobó que las palomas recordaban la ruta tan bien como si la hubiesen recorrido en solitario o con otras, y mucho mejor que las que hicieron el viaje en 2016.


TODOR DINCHEV/ALAMY STOCK PHOTO

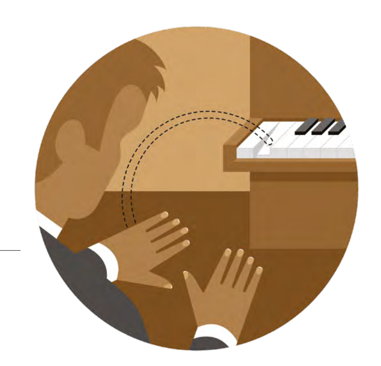
A Vernon Bingman, que estudia la orientación animal en la Universidad Estatal de Bowling Green y no ha tenido relación con el estudio, el resultado no le sorprende y cree que aporta otra confirmación de la notable memoria de las palomas mensajeras. «Acorta un poco la distancia entre nuestro egocentrismo en cuanto a las capacidades intelectuales humanas y lo que los animales son capaces de hacer.»

Robin Donovan

NEUROCIENCIA

DEDO FANTASMA

Una extraña ilusión señala a la filosofía y la robótica


THOMAS FUCHS

El cerebro contiene un mapa del cuerpo que habita, con neuronas especializadas en la percepción o el control de ciertas partes. Las investigaciones apuntan a que podría haber bastante margen de acción en esa representación. En 2016 se ideó un experimento en el que los participantes percibían fugazmente un sexto dedo en la mano (uno de ellos gritó: «¡Brujería!») y cuatro años más tarde otro grupo de investigación logró que esa sensación se prolongase de forma indefinida. Ahora, en su último trabajo, publicado en *Cognition*, este segundo grupo se ha superado al hacer que los participantes sintiesen el dedo supernumerario al tiempo que controlaban la longitud percibida de ese dedo.

Para experimentar la ilusión mental, el probando colocaba las manos sobre una mesa con un espejo vertical situado entre ellas y orientado de tal modo que el reflejo de la mano derecha se proyectaba donde debiera estar la izquierda. Comenzando por el pulgar, los experimentadores acariciaban por turnos la pun-

ta de cada dedo dos veces, simultáneamente en ambas manos. Cuando llegó el turno de los meñiques, acariciaron la punta de ambos y también la parte interior del meñique izquierdo. Por último, hicieron 20 caricias dobles sobre la mesa junto al meñique derecho al tiempo que acariciaban el lado externo del meñique izquierdo, creando así la sensación de un sexto dedo invisible en la mano izquierda, según los testimonios.

«Francamente da miedo», afirma Denise Cadete, estudiante de posgrado de neurociencias en el Colegio Birkbeck, de la Universidad de Londres, y autora principal del nuevo artículo. «Aunque entendamos todo lo que está sucediendo, la ilusión no se desvanece, así que es una sensación muy sorprendente.»

En el estudio más reciente del grupo, las caricias en la mesa tenían a veces la mitad o el doble de largo que un meñique corriente. Veinte participantes diestros usaron una regla deslizante para indicar la longitud del dedo fantasma que percibían; en promedio era 1,5 centímetros más corto o tres centímetros más largo que su meñique. Tales diferencias indican que el dedo fantasma no era percibido meramente como un segundo meñique, sino como otro miembro con entidad propia.

Cadete explica que, aparte de las intrigantes implicaciones filosóficas en relación con la conciencia de uno mismo, la investigación podría ser útil para las personas con extremidades robóticas. Cree que un apéndice mecánico podría infundir la sensación a una parte cercana del cuerpo a través de esas ilusiones mentales, incluso en el caso de extremidades dotadas de características complejas, como una «navaja suiza».

El experimento está bien ejecutado, según Etienne Burdet, experto en robótica del Colegio Imperial de Londres ajeno a la investigación que ha estudiado las habilidades manuales de las personas nacidas con polidactilia. En futuros estudios se podrá investigar si el fenómeno es reproducible fuera del meñique supernumerario; Burdet afirma que, si quisiera fundar una empresa fabricante de prótesis robóticas, «comenzaría por el brazo».

Matthew Hutson

BIODIVERSIDAD

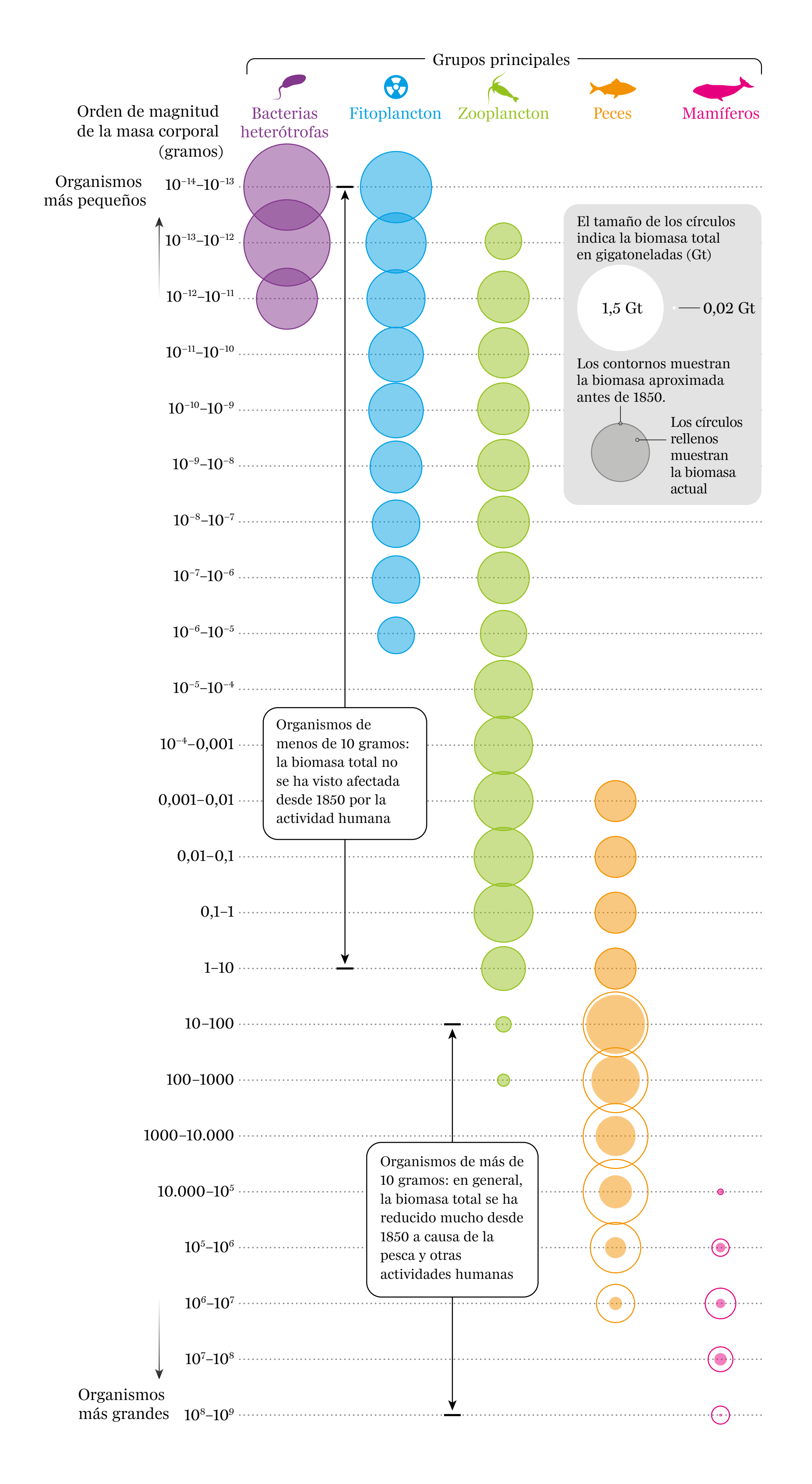
EL PESO DE LA VIDA MARINA

La humanidad podría haber alterado la distribución de biomasa de los océanos.

Si pesáramos todas las criaturas que pueblan los mares, hallaríamos una relación sorprendente. Un equipo de investigadores ha descubierto que, si agrupamos estas formas de vida por tamaño, su masa total sigue aproximadamente una distribución matemática regular. Sin embargo, es posible que los seres humanos hayamos modificado en parte ese patrón.

Los autores del estudio, publicado en *Science Advances*, combinaron imágenes de satélite, muestras de agua, datos de capturas pesqueras y simulaciones informáticas para calcular el peso conjunto de todos los organismos que viven en mar abierto. Luego representaron la distribución de la biomasa en un «espectro de tamaños», para lo cual agruparon las distintas especies en 23 clases en función del peso. Dadas las enormes diferencias de tamaño existentes, los investigadores emplearon una escala logarítmica, de modo que el peso medio de los organismos incluidos en dos clases adyacentes difería en un factor de 10. Así, un grupo englobaba a los organismos de entre 0,01 y 0,1 gramos, el siguiente a los organismos de entre 0,1 y 1 gramo, y así sucesivamente.

Los científicos descubrieron que la mayoría de esos grupos contenían en torno a una gigatonelada (mil millones de toneladas) de biomasa. «Podría tratarse de una de las regularidades



FUENTE: «THE GLOBAL OCEAN SIZE SPECTRUM FROM BACTERIA TO WHALES», POR IAN A. HATTON ET AL. EN *SCIENCE ADVANCES*, VOL. 7, ART. EABH3732, NOVIEMBRE DE 2021; AMANDA MONTAÑEZ (*gráfico*)

a mayor escala referidas a la vida de nuestro planeta», afirma Ian Hatton, biólogo del Instituto Max Planck de Matemáticas en las Ciencias de Leipzig y primer autor del estudio. Las excepciones eran algunas clases que contenían bacterias, donde había un exceso de masa debido al predominio de los microorganismos en las aguas profundas, y las clases que agrupaban a los animales de más de 10 gramos, cuya masa era desproporcionadamente baja.

Hatton y su equipo se preguntaban si el ser humano habría contribuido a esas discrepancias. Para estudiarlo, usaron simulaciones informáticas y cálculos de la población animal ya publicados para reconstruir el espectro de tamaños del océano en la década de 1850, antes de que comenzara la pesca industrial moderna. Los investigadores hallaron que el peso combinado de los organismos de más de 10 gramos, entre los que figuran las ballenas y otros muchos peces, ha disminuido en un 60 por ciento desde entonces.

La sobrepesca es un problema bien conocido, pero este trabajo ayuda a comprender su alcance, opina Andrea Bryndum-Buchholz, ecóloga marina de la Universidad Memorial de Terranova ajena al estudio. «Muestra los cambios fundamentales que hemos provocado en los océanos.»

Nikk Ogasa

MEDICINA

ESCÁNERES PORTÁTILES

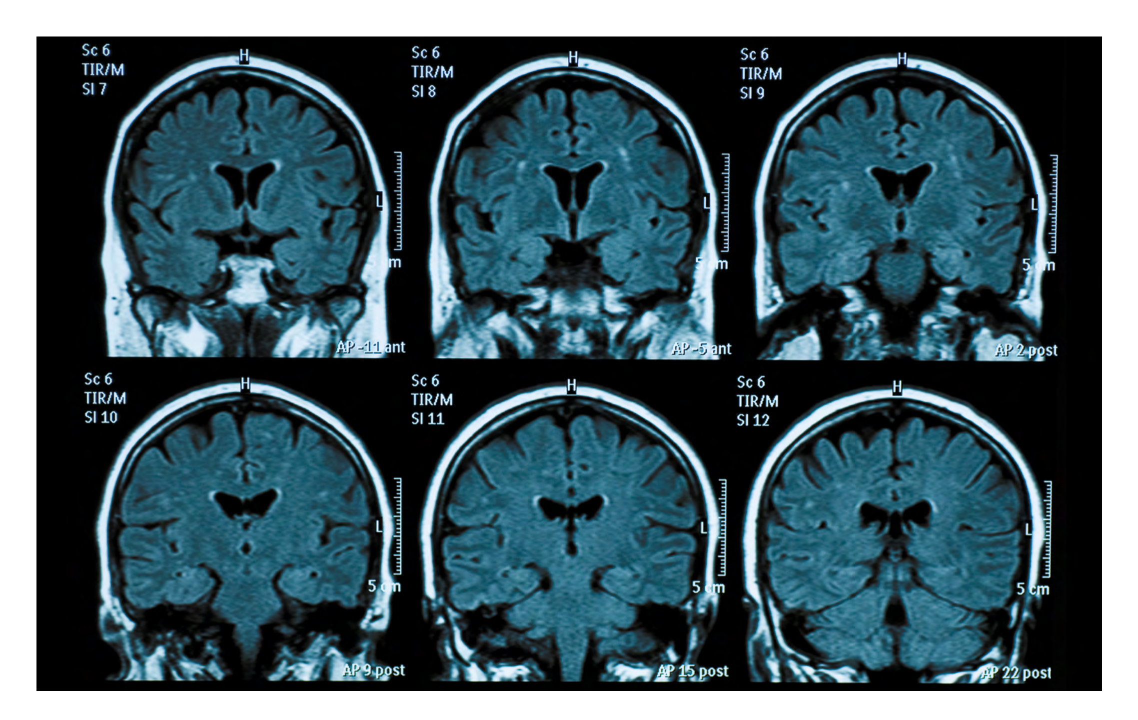
Los aparatos compactos podrían reducir el coste de las resonancias magnéticas.

Los escáneres de resonancia magnética son herramientas cruciales en la medicina moderna. Sin embargo, estos enormes instrumentos suelen costar entre 1 y 3 millones de dólares. Además, requieren salas especiales para contener los potentes campos magnéticos generados y bloquear las señales externas, así como complejos sistemas de refrigeración por helio líquido. Alrededor de dos tercios de la población mundial carecen de acceso a estos aparatos, el 90 por ciento de los cuales se encuentran en países de renta alta.

No obstante, las alternativas de bajo coste ya son casi una realidad. En un estudio publicado en *Nature Communications*, un grupo de la Universidad de Hong Kong dirigido por el ingeniero biomédico Ed Wu describe un aparato de resonancia magnética que es lo bastante compacto como para trasladarlo sobre ruedas, no necesita blindaje y se conecta a un enchufe normal. Este sistema de resonancia magnética «de campo ultrabajo» (ULF, por sus siglas en inglés) carece de la resolución que requieren algunos diagnósticos de precisión, pero sus costes de fabricación no superarían los 20.000 dólares. Además, el diseño y los algoritmos del aparato son de código abierto, lo que anima a los investigadores de todo el mundo a contribuir a su desarrollo.

La resonancia magnética aprovecha el hecho de que la mayor parte del cuerpo humano es agua. Los protones de los átomos de hidrógeno del agua tienen momentos magnéticos de espín, que pueden alinearse temporalmente debido al campo magnético de un escáner y ser examinados mediante pulsos de radiofrecuencia. Los diferentes tejidos poseen concentraciones de agua y propiedades magnéticas distintas, lo cual genera contrastes de claros y oscuros en las imágenes reconstruidas.

El diseño de ULF emplea imanes permanentes que no precisan refrigeración, en vez de los electroimanes superconductores habituales. Asimismo, genera campos magnéticos menos intensos que los de un aparato estándar de resonancia magnética, por lo que no requiere sistemas de protección. Su principal desventaja radica en que las señales son más débiles, y eso reduce la resolución de las imágenes.



YUMIYUM/GETTY IMAGES

Las máquinas de resonancia magnética son muy útiles para obtener imágenes del cerebro.

Para facilitar la portabilidad, el nuevo diseño prescinde del blindaje contra el ruido externo de radiofrecuencia. A cambio, un algoritmo de aprendizaje profundo reconoce y predice las interferencias y luego las elimina de las señales medidas. «Es una innovación muy útil», valora Sairam Geethanath, ingeniero biomédico de la Universidad de Columbia ajeno al estudio. «Es similar a los auriculares con cancelación de ruido, que intentan descubrir el patrón del ruido en tiempo real para suprimirlo.»

Los investigadores probaron el dispositivo con 25 pacientes y compararon las imágenes obtenidas con las de un aparato estándar de resonancia magnética. Y, en general, lograron identificar las mismas patologías, que incluían tumores y derrames cerebrales. «Las imágenes parecen tener la calidad suficiente para ser de utilidad clínica en diversas situaciones», afirma Tom Johnstone, neurocientífico de la Universidad de Tecnología Swinburne de Melbourne que tampoco participó en el estudio. «Si la resonancia magnética de ULF estuviera disponible en más ciudades o incluso en las unidades móviles, eso facilitaría la evaluación rápida de los accidentes cerebrovasculares, que tiene un gran impacto en el éxito de las intervenciones.»

El nuevo diseño se suma a la creciente lista de escáneres de resonancia magnética de ULF en desarrollo. El año pasado, la compañía estadounidense Hyperfine obtuvo la autorización de la Administración de Alimentos y Medicamentos de ese país para construir un escáner portátil, si bien los detalles del diseño son confidenciales. Por contra, los datos, diseños y algoritmos de Wu y sus colaboradores están disponibles en línea, lo que podría acelerar las mejoras en la técnica de ULF.

El objetivo último no es que los aparatos de ULF sustituyan completamente a los escáneres de campos altos, pero resultan prometedores en contextos de triaje, donde los pacientes no pueden trasladarse o el tiempo es crucial, explica Geethanath.

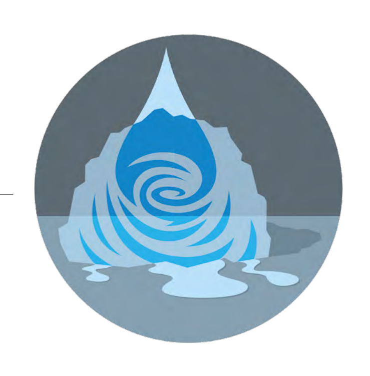
Wu cree que el abanico de aplicaciones se ampliará conforme vayan mejorando las prestaciones. «Ahora mismo, los sistemas de resonancia magnética se construyen como si no supiéramos nada sobre lo que escaneamos», indica. «Pero a menudo la información que necesitamos es muy sutil» y conlleva identificar diferencias entre lo observado y lo esperado. «Esto supondrá una gran revolución, impulsada por métodos informáticos de bajo coste.»

Simon Makin

DINÁMICA DE FLUIDOS

TURBULENCIA ELÁSTICA

Un experimento explica el extraño comportamiento de algunos líquidos al atravesar un medio poroso.



THOMAS FUCHS

En la mayoría de fluidos, un aumento de la presión produce un incremento súbito de la velocidad, como cuando apretamos un bote de kétchup. Pero al atravesar materiales porosos, como la tierra o las rocas sedimentarias, algunos líquidos experimentan el efecto opuesto: la presión los frena. Determinar la causa de esta ralentización sería útil para actividades como la descontaminación de acuíferos o la extracción de petróleo, donde inyectar un líquido en el suelo obliga a que salga otro. Sin embargo, observar directamente ese movimiento no resulta sencillo.

El ingeniero químico Christopher Browne y el físico Sujit Datta, ambos de la Universidad de Princeton, han logrado solucionar ese problema. Los investigadores modificaron un líquido especial para hacerlo transparente y lo bombearon a través de los poros de una roca artificial, también transparente. Así, documentaron cómo el movimiento del líquido se vuelve caótico, generando remolinos que atascan los poros y frenan el flujo.

Los líquidos de interés, denominados soluciones poliméricas, contienen cadenas de moléculas largas y elásticas habituales en biología, así como en las industrias cosmética y energética. De acuerdo con los análisis teóricos, cuando esas cadenas se estiran a través de un canal casi bidimensional y vuelven a contraerse, generan fuerzas que dan lugar a remolinos. Sin embargo, determinar si esa turbulencia «se produce en rocas porosas, sedimentos y suelos tridimensionales realistas ha suscitado acalorados debates», indica Datta.

A fin de resolver la controversia, los investigadores inyectaron una solución polimérica sintética en una «roca sedimentaria» simulada, construida a partir de una caja llena de minúsculas perlas de vidrio. Además, diluyeron ligeramente la solución polimérica para variar el modo en que se refractaba la luz y conseguir que la «roca» fuera totalmente transparente aun cuando estaba saturada.

Los científicos añadieron partículas fluorescentes a la solución polimérica y siguieron su movimiento a través de los poros mediante un microscopio, registrando las zonas donde se producían remolinos irregulares y estudiando cómo fluía la solución al someterla a distintas presiones. De este modo, confirmaron que la ralentización a escala macroscópica tenía el origen microscópico sospechado: las cadenas de polímero se estiraban y volvían a plegarse al atravesar los poros. Los resultados se han publicado en *Science Advances*.

«Visualizar el flujo en un medio poroso tridimensional literalmente abre una ventana a un fenómeno que era imposible observar», comenta Paulo Arratia, ingeniero bioquímico de la Universidad de Pensilvania que no participó en el estudio. Como siguiente paso, «sería maravilloso poder ver cómo se estiran y repliegan las moléculas, para conectar el punto de vista molecular y el microscópico».

De cara a las aplicaciones industriales, hay que conocer las presiones concretas que llevan a una solución polimérica a circular con un caudal determinado a través de un material poroso. El estudio proporciona un modelo físico que describe esa relación y permitiría predecir, por ejemplo, la cantidad de contaminante que podría recuperarse de una planta química al inyectar una solución. «Sin predictibilidad», recuerda Datta, «las operaciones de inyección han de realizarse por prueba y error».

Rachel Berkowitz

PLANTAS PARÁSITAS

Estudian la tensa relación entre una enorme flor carnosa y su planta anfitriona

Poco se sabe sobre el modo en que las plantas parasitarias del género *Rafflesia*, que producen la flor más grande y apestosa del mundo, infectan a sus plantas anfitrionas. *Rafflesia* pasa casi toda su vida como una maraña de células filiformes, discretamente escondida bajo la corteza de una enredadera leñosa denominada *Tetrastigma*, hasta que brota en forma de capullos de un tono apagado y tan grandes como una pelota de golf. Con el tiempo, esos brotes se convierten en flores carnosas que huelen a carne podrida y pueden alcanzar 9 kilogramos de peso y un metro de diámetro. La botánica de la Universidad de Long Island Jeanmaire Molina lleva desde 2017 intentando infectar plántulas de *Tetrastigma* con semillas de *Rafflesia* en el laboratorio, por el momento sin éxito. Su último trabajo, publicado en la revista *Planta*, ahonda en el modo en que algunas posibles anfitrionas logran frustrar a este espectacular parásito.

Molina y sus colaboradores extrajeron y analizaron más de 10.000 sustancias producidas por esquejes de *Tetrastigma* infectados y no infectados, procedentes de las selvas filipinas. Los investigadores descubrieron que los esquejes no infectados contenían altos niveles de alcaloides bencilisoquinolínicos, un grupo de compuestos entre los que figuran la morfina y la codeína.

Es la primera vez que se observan esos alcaloides en *Tetrastigma* o en otras plantas de la misma familia (a la que también pertenece la vid). A Molina le intriga que esa enredadera sea capaz de producir sustancias tan potentes desde el punto de vista biológico. Aún se desconocen las razones exactas por las que sucede, aunque la botánica sospecha que la planta usa los alcaloides a modo de ataque preventivo para evitar la infección. Quizás, añade, la estrategia inicial de *Rafflesia* consista en inhibir esta secreción y asediar a su anfitriona.

En cualquier caso, el hallazgo es «bastante sorprendente», valora Charles Davis, biólogo evolutivo de la Universidad Harvard que no



MAZZZUR/GETTY IMAGES

Ejemplar de *Rafflesia* en flor en Sumatra.

participó en el estudio. «Las plantas son unas químicas increíbles», prosigue, y el trabajo supone un paso importante para desmitificar las interacciones entre parásito y anfitrión.

Ahora, Molina espera descubrir la manera de inclinar la balanza hacia *Rafflesia*. Su objetivo a largo plazo es extraer algunas de estas flores en peligro de extinción de su hábitat en el sudeste asiático y ponerlas al alcance del resto del mundo. Aprender cómo funcionan las defensas de *Tetrastigma* (y cómo socavarlas) constituye un buen punto de partida.

Molina tiene una maceta de *Tetrastigma* en su despacho de la universidad y va esparciendo sobre ella semillas de *Rafflesia*, con la esperanza de que prendan. Por ahora no lo ha logrado, pero mantiene la rutina. «Creo que hay una manera, aunque aún no sepamos cuál», asegura. «De un modo u otro lo conseguiremos.»

Shi En Kim

LENTOS PERO CONSTANTES

Las serpientes y los lagartos apostaron a lo seguro en su evolución inicial y acabaron desbancando a sus parientes más primitivos

Los lagartos y las serpientes reptan por casi todos los continentes, con las más de 10.000 especies que integran el orden de los escamosos (*Squamata*), adaptadas a numerosos ambientes. Pero esta vasta diversidad tardó un tiempo sorprendentemente largo en surgir, según el paleontólogo de la Universidad de Bristol Jorge Herrera-Flores y sus colaboradores. Aseguran que en lugar de probar nuevas adaptaciones lo antes posible, los escamosos triunfaron evolucionando a un ritmo relativamente lento y constante; una idea que contraviene numerosos postulados de los biólogos sobre las razones y los modos en que la vida genera la diversidad.



ISTOCK/ BEAUTIFULBLOSSOM

En un estudio publicado en *Palaeontology*, el equipo traza la evolución de los escamosos comparándola con la de otros parientes reptilianos esquivos, los rincocéfalos, muy abundantes en el pasado remoto, pero hoy representados por una sola especie viviente, el tuátara de Nueva Zelanda. «Hace décadas que se debate la causa del declive de los rincocéfalos», afirma Herrera-Flores.

Los autores observaron una pauta inusual: las trayectorias evolutivas de los dos grupos estaban invertidas. Las diferencias en la talla corporal de los escamosos surgieron durante los dos primeros tercios de la existencia del grupo, hace entre 240 y 80 millones de años. En aquella misma época, los rincocéfalos se diversificaron con rapidez en una profusión de tamaños distintos, hasta que esa diversidad se desmoronó.

Hasta ahora parecía que las explosiones de experimentos evolutivos garantizaban una larga pervivencia. En estudios anteriores sobre otros dos grupos de reptiles, los dinosaurios y los cocodrilos, se había planteado que la evolución temprana acelerada los ayudó a desplazar a los competidores y dominar en poco tiempo el paisaje. Por esa lógica, las variaciones aceleradas de los rincocéfalos deberían haber presagiado un éxito mayor. En cambio, Herrera-Flores y sus colaboradores argumentan que la evolución rápida pudo crear un tipo de volatilidad que los condenó a la extinción en menos tiempo. El ritmo pausado de los escamosos dio como resultado una historia más estable, seguida de un estallido tardío de la diversidad cuando los antepasados del tuátara ya se hallaban en crisis.

Los reptiles no son los únicos que adoptaron esa estrategia «lenta pero constante». Los peces óseos actuales son muy diversos, pero en un estudio precedente se llegó a la conclusión de que antaño no eran tan numerosos ni diversos como los holósteos, los parientes prehistóricos del gar (*Lepisosteus*) y los peces espátula (*Polyodontidae*) actuales. Tales estudios plantean que la diversificación rápida para ocupar más nichos no siempre es una receta de éxito a la larga.

Y a diferencia de sus primos, el linaje de los rincocéfalos del que desciende el tuátara presentó «velocidades de evolución sumamente lentas», subraya Tiago Simões, herpetólogo de la Universidad Harvard, que no ha participado en el estudio. Esa circunstancia lo ha convertido en un «fósil viviente», un vestigio de aquella antigua explosión evolutiva que acabó en un completo fiasco.

Riley Black

ENTOMOLOGÍA

LA ODISEA DE LA MARIPOSA MONARCA

Los datos aportados por la ciencia ciudadana indican por qué lugares y en qué momentos migra

La vieja guardia
En marzo, las monarcas que invernan en México viajan al norte. En el norte de este país y el sur de EE.UU. ponen los huevos que serán la primera generación del siguiente ciclo biológico.

1.ª generación
La gestación de los huevos primaverales dura un mes. A finales de abril nace la primera generación, que emprende el vuelo al norte y hará su puesta a lo largo del recorrido.

2.ª generación
Entre mayo y junio nace la segunda generación. El sur será pronto demasiado cálido para las monarcas, así que las nacidas viajan al norte. Su objetivo: engendrar más mariposas.

3.ª y 4.ª generaciones
A finales de verano emergen las últimas generaciones en el norte del área de distribución. En septiembre desandarán el camino rumbo al sur y desde noviembre hasta marzo permanecerán en las montañas de Michoacán antes de iniciar un nuevo ciclo.

Es primavera y las monarcas se ponen en marcha. Cada año abandonan sus densas aglomeraciones de invernada cerca de Ciudad de México rumbo al norte. Les aguardan cuatro meses y tres generaciones antes de alcanzar su destino. Una vez allí se afanan en congregarse en grupos lo bastante grandes para sobrevivir al próximo invierno. Es una tarea digna de Sísifo. La población oriental se ha desplomado un 80 por ciento en los últimos 20 años a causa de la degradación del hábitat (menos flores) a lo largo de su área de distribución, afirma Iman Momeni-Dehaghi, biólogo de la Universidad Carleton, en Ottawa. Es gracias a aficionados científicos, que han estado elaborando bases de datos como Journey North, que este biólogo ha podido localizar dónde nace la generación que invernará. Los datos podrían ayudar a los investigadores a diseñar intervenciones más específicas para este lepidóptero en rápido declive.

Katie Peek

Marzo: 1–15 (2266), 16–31 (4482)
Abril: 1–15 (5229), 16–30 (4164)
Mayo: 1–15 (4031), 16–31 (9218)
Junio: 1–15 (7776), 16–30 (5524)
Julio: 1–15 (9050), 16–31 (11893 observaciones)

Latitud: 60°, 50°, 40°, 30°, 20°

Edmonton, Alberta
Calgary, Alberta
Winnipeg, Manitoba
Thunder Bay, Ontario
Ciudad de Quebec
Montreal
Minneapolis
Toronto
Chicago
N. York
Washington
St. Louis
Nasville
Atlanta
Dallas
Houston
Corpus Christi, Texas
Monterrey, Nuevo León
Terrenos de invernada
Ciudad de México

Zona geográfica
Las monarcas procedentes de las zonas de invernada en México (*estrella naranja*) se extienden por Norteamérica al este de las Rocosas. Florida no se contempla porque las monarcas autóctonas invernan allí sin viajar a México.

60°, 45°, 30°, 15°

CÓMO INTERPRETAR LA GRÁFICA
Cada figura representa los avistamientos de monarcas orientales (huevos, larvas y adultos), registrados en la base de datos Journey North entre 2012 y 2021 (más de 66.000 puntos de datos). La anchura indica la cantidad de avistamientos en cada quincena, corregida con la población humana en esa latitud.

FUENTES: JOURNEY NORTH (*datos de avistamientos de monarcas*); CENTRO DE APLICACIONES Y DATOS SOCIOECONÓMICOS DE LA UNIVERSIDAD DE COLUMBIA (*datos demográficos*); KATIE PEEK (*gráfico*)

LA IMAGEN DEL MES

EL UNIVERSO VISTO DESDE LA TIERRA

Fotografías astronómicas que parecen tomadas desde el espacio

La NASA obtiene instantáneas increíbles de las estrellas, galaxias y nubes de gas que llenan el cosmos, pero tiene a su disposición potentes telescopios espaciales. En cambio, Miguel Claro, un astrofotógrafo portugués, toma todas sus imágenes del cielo nocturno desde la superficie, y puede llegar a usar casi cinco horas de exposición para cada una de ellas. Sus resultados le han granjeado puestos como embajador fotográfico del Observatorio Europeo Austral o como astrofotógrafo de la Reserva de Cielo Oscuro de Alqueva. La NASA también publica el trabajo de Claro de manera habitual en su imagen astronómica del día.

Esta fotografía muestra la nebulosa de Orión. Las enormes nubes de polvo y gas conocidas como nebulosas pueden ser los restos de estrellas moribundas o el lugar donde se forman otras nuevas, y eso último es lo que ocurre en este caso. El etéreo resplandor del gas se debe a la radiación ultravioleta que emiten cuatro grandes estrellas jóvenes y calientes situadas en el corazón de la nebulosa.

Leslie Nemo





ARQUEOLOGÍA

UNA MARAVILLA MECÁNICA DEL MUNDO ANTIGUO

Tony Freeth | Un equipo científico aporta novedades sobre los complejos engranajes del mecanismo de Anticitera, un valioso artefacto astronómico de la antigua Grecia

Un día de 1900, el buzo Elias Stadiatis, enfundado en una pesada escafandra con casco de cobre y latón y traje de lona, emergió del mar temblando de miedo, murmurando algo acerca de un «montón de cadáveres desnudos». Formaba parte de un grupo de pescadores de esponjas provenientes de la isla de Symi, en el este del mar Egeo, que había buscado refugio ante una violenta tormenta cerca de la pequeña isla de Anticitera, enclavada entre Creta y la Grecia continental. Cuando el temporal amainó y se sumergieron en busca de esponjas, dieron con un pecio lleno de tesoros griegos, los más importantes del mundo antiguo descubiertos hasta entonces. Los «cadáveres desnudos» no eran sino esculturas de mármol esparcidas por el fondo del mar junto con otros muchos objetos. Poco después, su hallazgo dio pie a la primera gran excavación submarina de la historia.

Uno de los objetos recuperados, un bulto del tamaño de un gran diccionario, pasó desapercibido entre otros hallazgos más interesantes a primera vista. Meses más tarde, en el Museo Arqueológico Nacional de Atenas, el objeto se rompió dejando al descubierto unas ruedas dentadas de precisión del tamaño de una moneda, hechas de bronce. Según los conocimientos de la época, los engranajes de ese tipo no existieron ni en la Grecia clásica ni en ningún otro lugar del mundo antiguo, pues no se habrían inventado hasta siglos después del naufragio, de modo que el descubrimiento suscitó una gran controversia.

Conocido como el mecanismo de Anticitera, el extraordinario artefacto ha desconcertado a historiadores y científicos desde hace más de 120 años. A lo largo de las décadas, el amasijo original se descompuso en 82 fragmentos que lo convirtieron en un rompecabezas endiabladamente difícil de resolver. Aparenta ser una calculadora astronómica de intrincada complejidad, algunas de cuyas funciones entendemos hoy razonablemente bien, pero quedan incógnitas por despejar. Sabemos al menos que es tan antiguo como el pecio donde fue hallado, fechado entre los años 60 y 70 a.C., si bien ciertos indicios apuntan a que pudo ser fabricado alrededor del 200 a.C.

En marzo de 2021, el grupo del Colegio Universitario de Londres (UCL) que dirijo, conocido como el Equipo de Investigación de Anticitera, publicó un nuevo estudio sobre él. Los integrantes somos yo mismo, matemático y cineasta, Adam Wojcik, científico de materiales, Lindsay MacDonald, especialista en técnicas de imagen, Myrto Georgakopoulou, experto en arqueometalurgia, y dos estudiantes de posgrado, David Higgon, horólogo, y Aris Dacanalis, físico. En el artículo proponemos una nueva explicación sobre el funcionamiento del engranaje delantero, un problema todavía irresoluto. Ahora es posible apreciar mejor el grado de sofisticación del ingenio, que pone en cuestión muchas de las ideas preconcebidas sobre el desarrollo técnico en la Grecia clásica.

En síntesis

El mecanismo de Anticitera es una calculadora astronómica fechada en el siglo II a.C. Los conocimientos técnicos que reúne superan con mucho los de cualquier otro ingenio conservado de la época y los siglos siguientes.

Las modernas técnicas de imagen han permitido escrutar el interior y deducir la estructura y las asombrosas prestaciones del artefacto, incompleto y seriamente dañado por dos milenios de corrosión marina.

Tras décadas de estudio, en este artículo se da a conocer un nuevo modelo hipotético, elaborado por un equipo científico internacional organizado *ex profeso* para su estudio.

La astronomía antigua

Sabemos que los griegos eran consumados astrónomos que hacían sus observaciones a simple vista. Estudiaban el cielo nocturno desde una perspectiva geocéntrica: cada noche seguían el movimiento de la bóveda celeste a medida que la Tierra rotaba sobre su eje. Las posiciones relativas de las estrellas no variaban, por lo que se referían a ellas como «estrellas fijas». Aquellos primeros astrónomos observaban también otros cuerpos que se movían en relación con el fondo estrellado: la Luna completaba una rotación en el cielo cada 27,3 días, mientras que el Sol tardaba un año.

Los otros cuerpos en movimiento eran los planetas, que en griego antiguo significa «errante», en virtud de sus movimientos erráticos. Tales objetos representaban el mayor problema astronómico de la época. Los estudiosos se preguntaban cuál sería su naturaleza y observaron

Calculadora celeste

Descubierto hace más de un siglo entre los restos de un naufragio, el mecanismo de Anticitera es el objeto de mayor complejidad técnica procedente del mundo antiguo hallado hasta la fecha. Se trata de un artefacto de bronce fechado entre los años 205 y 60 a.C. que contiene decenas de pequeños engranajes con dientes de un milímetro de longitud que permitían predecir las posiciones del Sol, la Luna y los planetas en un momento concreto. Un estudio reciente a cargo del equipo de investigación de Anticitera del Colegio Universitario de Londres ha propuesto un nuevo modelo que explica el funcionamiento del sistema de engranajes de la cara frontal.

Cara frontal: en el interior del ingenio, la «rueda motriz principal» hacía girar todos los engranajes, que a su vez movían una serie de punteros y anillos concéntricos con el fin de mostrar las posiciones de los cuerpos celestes. Un conjunto de pequeñas esferas indicaba las posiciones del Sol y la Luna, así como las fases lunares. Por otro lado, unas cuentas de colores marcaban la posición de los planetas en la eclíptica, el plano del sistema solar.

Cara trasera: la cara posterior contenía dos diales de gran tamaño y otros más pequeños. El gran dial superior era un calendario que representaba el ciclo metónico, un período de 19 años en el que se suceden 235 meses lunares o lunaciones. El dial inferior recoge el ciclo de saros, de 223 meses, que predice las fechas de los eclipses, tanto solares como lunares.





TONY FREETH

LAS ENTRAÑAS DE LA MÁQUINA

El nuevo modelo del mecanismo de Anticitera propone un total de 69 engranajes que conformaban una calculadora astronómica asombrosamente compleja. Buena parte de esa complejidad quedaba oculta en las entrañas del artefacto, donde varios trenes de engranajes acoplados realizaban diferentes cálculos. Ciertos engranajes cumplían una doble función y se empleaban con distintos fines. Desde el exterior, el usuario hacía girar el dial del calendario hasta situarlo en el momento deseado, bien fuera del pasado, el presente o el futuro, y los engranajes del interior movían los punteros y los anillos de la cubierta hasta mostrar el resultado de las predicciones celestes.

PLACA FRONTAL, VISTA INTERIOR

Puntero lunar

Nodos del puntero lunar

Engranajes del «sol real», Marte, Júpiter y Saturno

Los engranajes empleados para mostrar las posiciones del Sol, Marte, Júpiter y Saturno estaban fijados en una placa circular unida a la rueda motriz principal por unos pilares.

- Sol
- Marte
- Júpiter
- Saturno

Rueda motriz principal

Placa rectangular

Rueda motriz principal

La rueda central orquestaba los trenes de engranajes responsables del cálculo de las posiciones del Sol, la Luna y los planetas en un momento determinado.

- Sol
- Luna
- Nodos lunares

Engranaje de 53 dientes de movimiento variable asociado al sistema lunar

Rueda motriz principal

Corona asociada a los datos de entrada (conectada con la manivela, *no mostrada*)

Pilar

Engranaje de 38 dientes

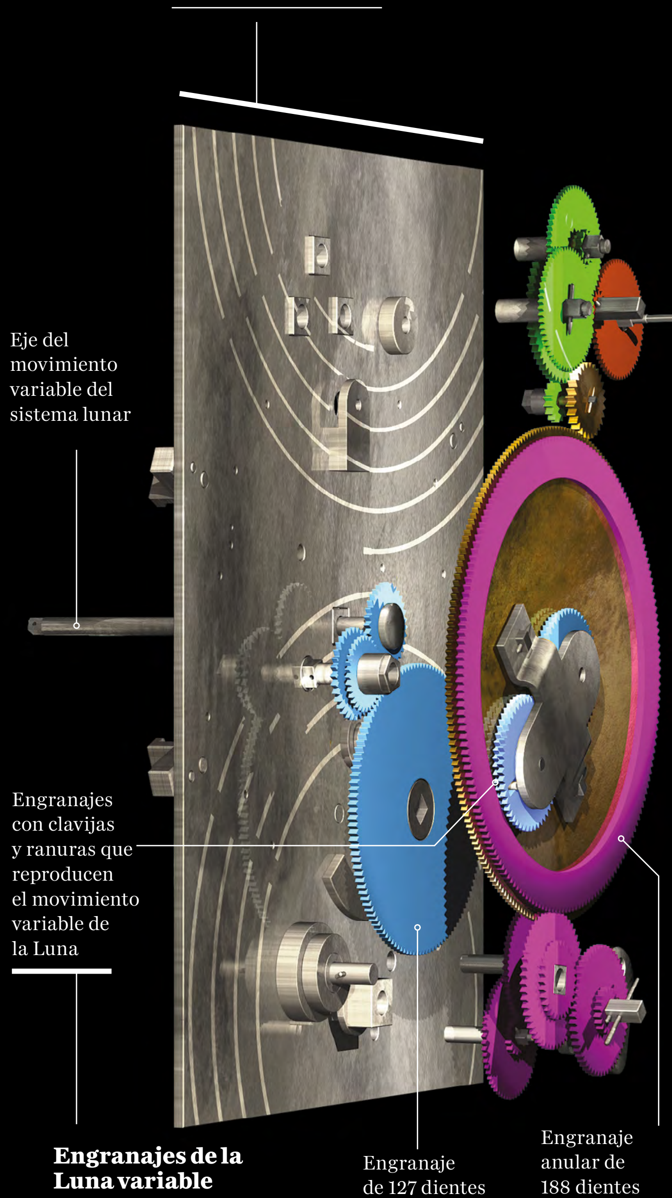
- Mercurio
- Venus

Engranajes de Mercurio y Venus

Las posiciones de Mercurio y Venus se calculaban mediante unos engranajes unidos a una placa rectangular que también se hallaba conectada a la rueda motriz principal por medio de pilares.

Placa principal con cojinetes

En la placa central instalada en el interior del mecanismo se montaban los trenes de engranajes que permitían girar los diales de las placas frontal y trasera.



Eje del movimiento variable del sistema lunar

Engranajes con clavijas y ranuras que reproducen el movimiento variable de la Luna

Engranajes de la Luna variable

Los antiguos babilonios y griegos sabían que la Luna presentaba un movimiento variable en relación con las estrellas; hoy sabemos que la razón es su órbita elíptica. Un tren de engranajes particularmente complejo calculaba ese movimiento de un modo extraordinario.

Engranaje de 127 dientes que calcula el movimiento medio de la Luna

Engranaje anular de 188 dientes (soldado a un engranaje de 223 dientes)

PLACA TRASERA

- Calendario metónico y calíptico
- Calendario olímpico
- Calendario de saros y exeligmos

Diales traseros

El dial trasero superior era un calendario metónico/calíptico que reconciliaba el mes lunar con el año solar. Incluía, además, un dial más pequeño que mostraba el ciclo de cuatro años de la Olimpiada, que determinaba la celebración de los Juegos Panhelénicos y solía emplearse como referencia temporal.
El dial inferior era un calendario de saros/exeligmos que predecía los eclipses solares y lunares según el ciclo de saros, de 223 meses. Sus índices se correspondían con los de unas inscripciones situadas en la placa trasera, que describían las características de los eclipses predichos por el artefacto.

TONY FREETH Y JEN CHRISTIANSEN (*gráfico*); EQUIPO DE INVESTIGACIÓN DE ANTICITERA DEL UCL (*modelo*)

que, en ocasiones, se movían en la misma dirección que el Sol, en movimiento directo, para luego detenerse y desplazarse en sentido contrario, es decir, trazando un movimiento retrógrado. Al cabo de un tiempo alcanzaban un nuevo punto estacionario y retomaban el movimiento directo. Tales rotaciones se conocen como los períodos sinódicos de los planetas, los períodos de su posición relativa respecto al Sol. Hoy podemos explicar esas extrañas inversiones del movimiento porque sabemos que los planetas orbitan alrededor del Sol y no de la Tierra, como creían entonces los griegos.

En términos actuales, todos los cuerpos celestes en movimiento giran en órbitas cercanas al plano donde la Tierra gira alrededor del Sol, la llamada eclíptica, por lo que todos siguen prácticamente la misma trayectoria con respecto al fondo de estrellas. Predecir las posiciones de los planetas a lo largo de la eclíptica entrañaba una gran dificultad para aquellos astrónomos. Y esa es precisamente una de las principales funciones del mecanismo de Anticitera. Otra consistía en calcular las posiciones del Sol y la Luna, cuyos movimientos también varían en relación con el firmamento.

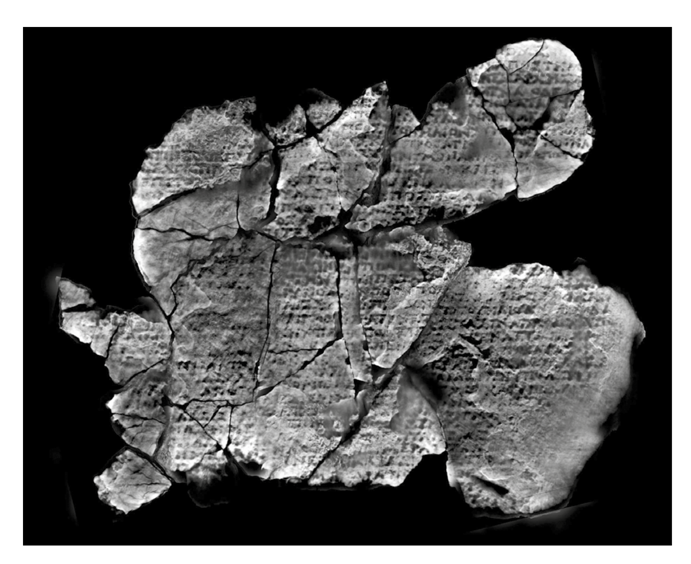
Gran parte del diseño del mecanismo se basa en los conocimientos adquiridos por antecesores de Oriente Próximo. La astronomía experimentó notables avances durante el primer milenio a.C. en Babilonia y Uruk, en el actual Irak. Los babilonios anotaban las posiciones diarias de los cuerpos celestes en tablillas de arcilla, que mostraban que el Sol, la Luna y los planetas se movían según ciclos repetidos, algo fundamental para hacer predicciones. Por ejemplo, la Luna completa 254 ciclos respecto al firmamento estrellado cada 19 años, un ejemplo de lo que se conoce como relación de período. En el diseño del mecanismo de Anticitera se tuvieron en cuenta varias relaciones de período babilónicas.

Uno de los pioneros más destacados en el estudio del mecanismo fue el filólogo alemán Albert Rehm, el primero en entender que estaba ante una máquina de cálculo. Entre 1905 y 1906 recogió sus descubrimientos trascendentales en unas notas de investigación todavía inéditas. En uno de los fragmentos halló inscrito el número 19. La cifra hacía referencia a la relación de período lunar de 19 años, conocido como ciclo metónico en honor al astrónomo heleno Metón, aunque los babilonios ya lo habían descubierto mucho antes. En ese mismo fragmento, Rehm halló otros dos números: el 76, un refinamiento griego del ciclo de 19 años, y el 223, que representa el número de meses lunares de un ciclo babilónico de predicción de eclipses, llamado ciclo de saros. Tales ciclos astronómicos constituían la base de la astronomía predictiva babilónica.

El mecanismo de Anticitera, con sus engranajes de precisión dotados con dientes de un milímetro de longitud, es completamente distinto a cualquier otro objeto del mundo antiguo

La segunda figura clave en la historia de la investigación del mecanismo de Anticitera fue Derek J. de Solla Price, un físico británico que más tarde se especializaría en historia de la ciencia. Tras veinte años de investigación, en 1974 publicó un artículo importante, Gears from the Greeks («Engranajes de los griegos»), donde mencionaba interesantes citas de Cicerón (106-43 a.C.), jurista, orador y político romano. En una de ellas, este describía una máquina fabricada por el matemático e inventor Arquímedes (287-212 a.C.) «en la que se delineaban los movimientos del Sol, la Luna y las cinco estrellas llamadas errantes... [los cinco planetas]... Arquímedes... había pensado en la manera de representar con precisión, mediante un solo artefacto que hiciera girar el globo terráqueo, esos movimientos diversos y divergentes con sus propias velocidades». La descripción recuerda al mecanismo de Anticitera. El pasaje sugiere que Arquímedes, pese a pre-

ceder a la época en que supuestamente se fabricó, podría haber iniciado la tradición que condujo a su construcción. Es muy posible que el mecanismo se basara en un diseño del inventor griego.



MENSAJE OCULTO: Las tomografías realizadas en 2005 revelaron inscripciones que habían permanecido ocultas en el mecanismo. Entre ellas figuran una lista de ciclos planetarios recogida en la cubierta frontal (*mostrada en la imagen)* e instrucciones de uso en la cubierta posterior.

Complejidad diabólica

Los investigadores llevaban décadas intentando desentrañar su funcionamiento estudiando la superficie de los fragmentos, pero hasta inicios de los setenta no se pudo escrutar su interior. Price colaboró con el radiólogo griego Charalambos Karakalos para obtener imágenes de rayos X. Para asombro de ambos, reconocieron 30 engranajes: 27 en el fragmento más grande y tres más en sendos fragmentos. Con ayuda de su mujer Emily, Karakalos pudo estimar por primera vez el número de dientes de cada rueda, un paso fundamental para entender qué cálculos se hacían con el mecanismo, que se antojaba más complicado de lo que nadie hubiera imaginado.

Las radiografías eran bidimensionales, por lo que el sistema de engranajes aparecía aplanado. Por otro lado, solo aportaban una visión parcial de la mayoría de ellos. En muchos casos solo era posible deducir indirectamente el número de dientes de las ruedas. A pesar de esas carencias, Price logró reconocer un tren de engranajes (un conjunto de ruedas dentadas conectadas entre sí) que calculaba la posición media de la Luna en una fecha determinada a partir de su relación de 254 rotaciones siderales cada 19 años. La llamada rueda motriz principal, una pieza prominente situada en el frente del mecanismo, impulsa el movimiento del tren, que comienza con el giro de una rueda de 38 dientes (el duplo de 19, dado que un engranaje de 19 dientes sería demasiado pequeño), la cual a su vez acciona, a través de otros engranajes, otra rueda de 127 dientes (la mitad de 254, pues el número completo exigiría una pieza demasiado grande).

Al parecer, el instrumento pudo servir para predecir las posiciones del Sol, la Luna y los planetas en un día concreto, pasado o futuro. El fabricante lo habría calibrado con las posiciones conocidas de esos cuerpos y el usuario solo tendría que girar una manivela para indicar el marco temporal deseado y obtener la correspondiente predicción astronómica. Por ejemplo, el mecanismo mostraba las posiciones en un «dial zodiacal» situado en la parte delantera, donde la eclíptica estaba dividida en doce arcos o secciones de 30 grados que representaban las constelaciones del zodiaco. A partir de los datos de rayos X, Price elaboró un modelo completo del conjunto de engranajes del instrumento.

Ese modelo me introdujo en el estudio del mecanismo. De hecho, en mi primer artículo, que titulé «Rebatiendo la investigación clásica», me dediqué a refutar la mayor parte de la estructura propuesta por él. A pesar de ello, Price sí había deducido con acierto las posiciones relativas de los principales fragmentos y descrito la estructura general de la máquina: un dial indicador de la fecha y el disco zodiacal en la parte frontal y dos grandes sistemas de diales en la parte trasera. La labor de Price supuso un paso importante en la resolución del misterio de Anticitera.

El tercer protagonista destacado en su estudio fue Michael Wright, comisario de ingeniería mecánica en el Museo de Ciencias de Londres. En colaboración con el profesor australiano de informática Alan G. Bromley, llevó a cabo un segundo examen con rayos X en 1990, esta vez empleando una de las primeras técnicas en 3D, conocida como tomografía lineal. Bromley

falleció antes de que el trabajo diera sus frutos, pero Wright persistió y logró importantes avances en el contaje de los dientes de los engranajes y en la comprensión del dial superior de la parte trasera.

En 2000 propuse un tercer análisis con rayos X, que en 2005 llevaría a cabo un equipo de académicos ingleses y griegos en colaboración con el Museo Arqueológico Nacional de Atenas. X-Tek Systems (hoy propiedad de Nikon) diseñó un prototipo de aparato para obtener imágenes de alta resolución en 3D mediante tomografía computarizada con fuente de rayos X con microenfoque. Hewlett-Packard empleó, además, una excelente técnica de digitalización de imágenes conocida como transformación de reflectancia para mejorar los detalles de la superficie.

Los nuevos datos nos dejaron boquiabiertos. La primera gran novedad salió a la luz cuando descubrí que el mecanismo podía predecir los eclipses además de los movimientos astrales. El hallazgo guardaba relación con la inscripción descubierta por Rehm, donde se mencionaba el ciclo de saros de 223 meses. Las nuevas imágenes captadas con rayos X revelaron un gran engranaje de 223 dientes en la parte trasera que hacía girar un puntero alrededor de un dial en espiral que daba un total de cuatro vueltas y estaba dividido en 223 secciones, una para cada mes del ciclo. Llamado así por el nombre que suele recibir el ciclo de los eclipses calculado por los babilonios, el «dial de saros» no solo predice los meses en que se producirán eclipses, sino también sus características, según las inscripciones grabadas en el propio mecanismo. Si bien nuestro descubrimiento había revelado otra asombrosa característica del artefacto, dejaba otro gran problema sin resolver: un grupo de cuatro engranajes, aparentemente sin función, situado dentro de la circunferencia del gran engranaje.

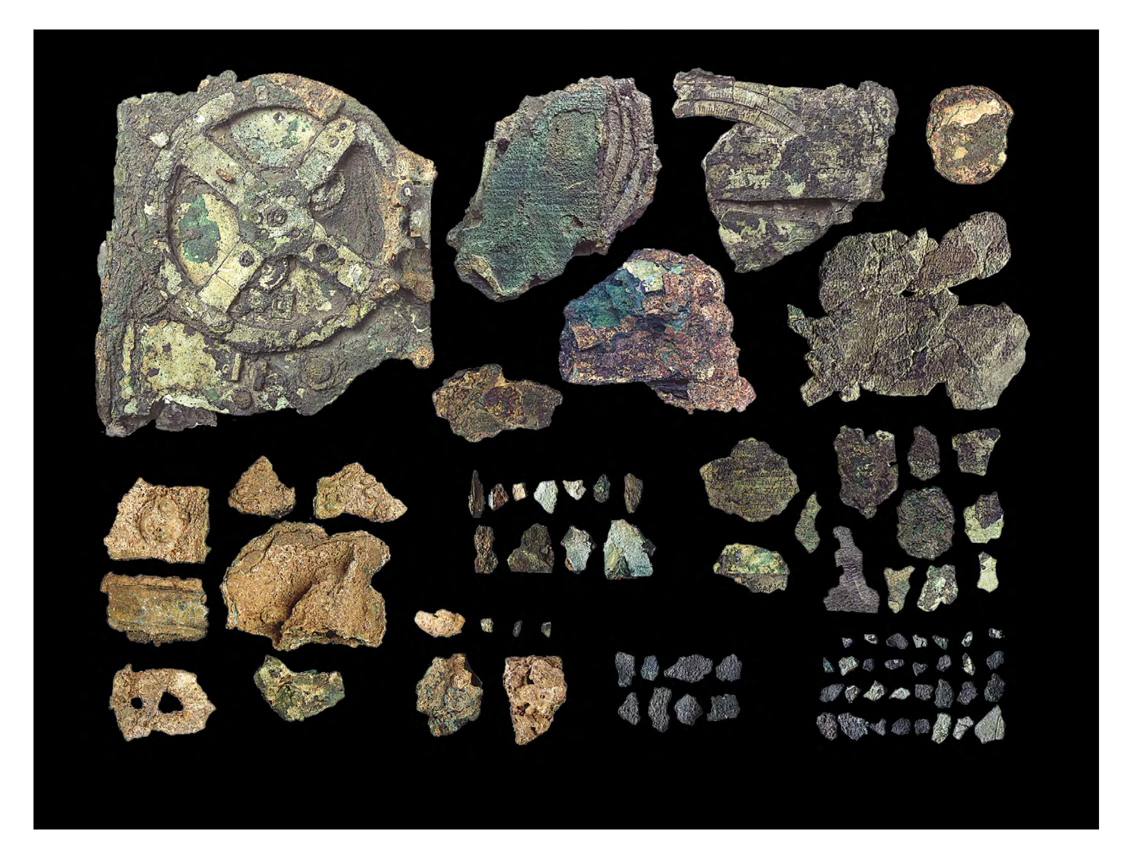
Pasaron meses antes de que averiguase la finalidad de los mismos. Cuando al fin lo conseguí, la conclusión fue asombrosa. Su cometido consistía en calcular el movimiento variable de la Luna de una forma realmente elegante. Hoy sabemos que nuestro satélite presenta un movimiento variable porque su órbita es elíptica: cuando se halla lejos de la Tierra, la Luna se mueve despacio en relación con las estrellas; cuando se encuentra cerca, se mueve más rápido. Ahora bien, su órbita no permanece fija en el espacio, sino que rota con un período de unos nueve años. Los antiguos griegos no conocían las órbitas elípticas, así que explicaban el sutil movimiento lunar combinando dos movimientos circulares superpuestos, según la llamada teoría epicíclica.

Deduje la forma en que el mecanismo calculaba las trayectorias epicíclicas basándome en una importante observación de Wright, que había estudiado dos de los cuatro misteriosos engranajes de la parte trasera y había observado que uno de ellos presentaba una clavija inserta en una ranura del otro engranaje, lo cual podría parecer una disposición inútil puesto que, seguramente, los dos engranajes giraban juntos a la misma velocidad. Sin embargo, Wright se percató de que ambos giraban sobre dos ejes separados por poco más de un milímetro, por lo que el sistema generaba un movimiento variable. Todos esos detalles se aprecian en las imágenes tomográficas. Los ejes de ambos engranajes no son fijos: están montados en configuración epicíclica en el gran engranaje de 223 dientes.

Wright descartó la idea de que esos dos engranajes calcularan el movimiento variable de la Luna porque, en su modelo, la rueda dentada de 223 dientes giraba demasiado rápido para que esa idea tuviera sentido. Pero en mi modelo, la rueda se movía con la lentitud suficiente para hacer girar el puntero del disco de saros. El cálculo del movimiento de la Luna de una forma tan sutil e indirecta mediante engranajes epicíclicos, provistos de clavijas y ranuras, constituye un logro extraordinario de los antiguos griegos. Tal demostración de ingenio refuerza la idea de que la máquina pudo ser diseñada por Arquímedes. El estudio de los diales y los engranajes traseros completó nuestro conocimiento de la parte posterior del mecanismo, reconciliando así todas las pruebas acumuladas hasta la fecha. Mis colaboradores y yo publicamos nuestros hallazgos en 2006 en *Nature*. Sin embargo, la otra cara del artefacto seguía siendo un enigma.

El frente del mecanismo

El componente más prominente de la parte frontal del fragmento más grande es la rueda motriz principal, diseñada para completar una rotación en un año. A diferencia de la mayoría de los demás engranajes, no consiste en un disco plano, sino que presenta cuatro radios y está repleta de elementos desconcertantes. Hay indicios de que en los radios descansaban co-



FRAGMENTOS: Con los años, el amasijo corroído se ha ido fragmentando en 82 piezas. Averiguar cómo encajan entre sí ha supuesto un verdadero rompecabezas para los investigadores. El fragmento de mayor tamaño contiene la rueda motriz principal (*arriba a la izquierda*).

jinetes, ya que están provistos de agujeros circulares a través de los cuales girarían ejes. En el margen externo del engranaje despunta un anillo de pilares (pequeños salientes perpendiculares, con refuerzos laterales y extremos perforados), cuya función era sin duda la sujeción de placas. Cuatro pilares cortos sostenían una placa rectangular, mientras que otros cuatro más largos sostenían una placa circular.

Siguiendo las teorías de Price, Wright propuso que en la rueda motriz se había fijado un gran sistema epicíclico; la idea basada en dos círculos superpuestos con la que los griegos explicaban las extrañas inversiones de los movimientos planetarios. Wright llegó a construir en latón un modelo real del sistema de engranajes para mostrar su funcionamiento. En 2002 publicó un revolucionario modelo de planetario, basado en el mecanismo de Anticitera, donde se mostraban los cinco planetas conocidos en la antigüedad (Urano y Neptuno no se descubrirían hasta los siglos XVIII y XIX, gracias al telescopio). Demostró, pues, que las teorías epicíclicas podían traducirse en trenes de engranajes epicíclicos con mecanismos de clavija y ranura que reproducían los movimientos variables de los planetas.

Cuando vi por primera vez el modelo de Wright, me sorprendió su complejidad mecánica. Contaba incluso con una serie de ocho tubos concéntricos dispuestos en torno a un mismo eje (coaxiales), que trasladarían la información a la cara frontal del instrumento. ¿Era posible que en la antigua Grecia se hubiese podido construir algo tan avanzado? Ahora creo que la explicación de Wright sobre los tubos coaxiales podría ser correcta, pero su sistema de engranajes no encaja con la economía y la inventiva que presentaban los trenes de engranajes conocidos. Nuestro equipo del UCL asumió el reto de conciliar los tubos coaxiales de Wright con lo que sabíamos sobre el resto del mecanismo.

El estudio por tomografía computarizada de 2005 nos dio una pista fundamental. Además de permitirnos ver los engranajes en tres dimensiones, las imágenes desvelaron un ele-

mento inesperado: miles de letras, ocultas en el interior de los fragmentos, que nadie había leído durante más de 2000 años. En sus notas de investigación de 1905 y 1906, Rehm suponía que las posiciones del Sol y los planetas se visualizaban en un sistema de anillos concéntricos. El mecanismo original tenía dos cubiertas, frontal y trasera, que protegían los diales y contenían largas inscripciones. La inscripción trasera, descubierta en las imágenes de 2005, era un manual de uso. En 2016, Alexander Jones, profesor de historia de la astronomía en la Universidad de Nueva York, halló las pruebas definitivas que confirmaban la idea de Rehm acerca de su significado: una descripción detallada de la forma en que se visualizaban el Sol y los planetas en los anillos, con cuentas que indicaban sus posiciones.

Cualquier modelo que quisiera explicar el funcionamiento del mecanismo debería ser compatible con esa explicación inscrita en la cubierta trasera, hemos de presumir que por sus constructores. Pero los modelos precedentes no habían podido incorporar ese sistema de anillos debido a un problema técnico que no sabíamos resolver. Wright había descubierto que el instrumento contaba con una esfera semiplateada para mostrar la fase lunar, un parámetro que se calculaba mecánicamente restando un valor de entrada para el Sol a un valor de entrada para la Luna. Pero ese proceso parecía incompatible con el sistema de anillos de visualización de los planetas, ya que los ejes de Mercurio y Venus impedían que el dispositivo de fases lunares accediera al valor de entrada del sistema de engranajes correspondiente al Sol. En 2018, Higgon, uno de los dos estudiantes de nuestro equipo del UCL, tuvo una idea sorprendentemente sencilla que solucionaba de forma impecable ese problema técnico y explicaba la función de un misterioso bloque perforado que se hallaba en uno de los radios de la rueda motriz principal. El bloque podía transmitir directamente la rotación del «sol medio» (en contraposición a la rotación variable del «sol real») al dispositivo de fases lunares. Esa configuración era compatible con el sistema de anillos situado en la parte frontal del mecanismo, que reflejaba de manera fiel la descripción inscrita en la parte trasera.

Descifrar el funcionamiento de la parte delantera del instrumento requería saber qué ciclos planetarios estaban plasmados en él, puesto que definían el modo en que los trenes de engranajes calculaban las posiciones de los planetas. Los trabajos anteriores asumían que tales ciclos se basaban en las relaciones de período planetarias deducidas por los babilonios. Pero en 2016, Jones descubrió algo que nos obligó a descartar esa suposición.

Las imágenes tomográficas mostraron que la inscripción de la cubierta frontal se encontraba dividida en cinco secciones, una para cada planeta. En la de Venus, Jones halló el número 462 y, en la de Saturno, el 442. Ambas cifras nos sorprendieron. En ningún estudio se había sugerido que los astrónomos antiguos las conocieran. De hecho, eran relaciones de período más precisas que las deducidas por los babilonios. Al parecer, los diseñadores del mecanismo de Anticitera habían calculado mejor sus propias relaciones de período para dos planetas: 289 ciclos sinódicos en 462 años en el caso de Venus y 427 ciclos sinódicos en 442 años para Saturno.

Jones nunca averiguó cómo dedujeron los antiguos griegos esos períodos, así que nos propusimos resolver la incógnita. Dacanalis, el otro estudiante del equipo del UCL, elaboró una lista con todas las relaciones de período planetarias calculadas por los astrónomos babilónicos, junto con los errores estimados. ¿Quizá la clave de ese cálculo más preciso reflejado en el mecanismo de Anticitera residiera en una serie de combinaciones de esas relaciones anteriores? Finalmente hallamos un método ideado por el filósofo Parménides de Elea (siglos VI-V a.C.) y recogido por Platón (siglos V-IV a.C.), que combinaba relaciones de período conocidas para obtener otras mejores.

Propusimos que cualquier método que hubieran usado los creadores del mecanismo se habría atenido a tres criterios: precisión, factorización y economía. El método debía ser preciso para que los valores coincidiesen con las relaciones de período conocidas para Venus y Saturno, al tiempo que factorizable para que los movimientos planetarios pudieran calcularse con engranajes lo bastante pequeños para caber en el mecanismo. Y para ser económico, varios planetas podían compartir engranajes siempre y cuando sus relaciones de período compartiesen factores primos, pues ello permitía reducir el número de engranajes. Ese principio de economía es una característica fundamental de los trenes de engranajes que se han conservado. Conforme a tales criterios,

¿Por qué tuvieron que pasar siglos antes de que se reinventara algo tan complejo? ¿Y por qué no se han descubierto otros mecanismos similares?

nuestro equipo obtuvo períodos de 462 y 442 empleando la idea de Parménides. Con los mismos métodos calculó los períodos faltantes de los demás planetas, cuyas inscripciones se han perdido o están dañadas.

Conocidas las relaciones de período de los planetas, es posible entender cómo encajaban los trenes de engranajes planetarios en los estrechos espacios disponibles. En el caso de Mercurio y Venus, propusimos mecanismos económicos de cinco engranajes con clavijas y ranuras, similares a los propuestos por Wright para esos planetas. En un fragmento de cuatro centímetros de diámetro hallamos indicios que respaldaban firmemente nuestra reconstrucción. Las imágenes tomográficas mostraron que la pieza contenía un disco unido a una rueda de 63 dientes que giraba en una placa en forma de D. El número 63 comparte los factores primos 3 y 7 con 462 (el período de Venus), lo que permitía diseñar un tren de engranajes con ruedas de 63 dientes que encajara en el cojinete de uno de los radios de la rueda motriz principal. En el caso de Mercurio, una estructura similar coincidiría también con elementos del radio opuesto. Tales observaciones nos hicieron pensar que íbamos bien encaminados en cuanto a Mercurio y Venus.

En cuanto al resto de planetas entonces conocidos (Marte, Júpiter y Saturno), nuestro equipo propuso sistemas compactos, encajables en el espacio disponible, una idea que contrastaba radicalmente con los mecanismos pensados por Wright para esos planetas. En una colaboración independiente, Christián C. Carman, de la Universidad Nacional de Quilmes, en Argentina, y yo habíamos demostrado que el sutil sistema indirecto de engranajes con que se representaba el movimiento variable de la Luna podía adaptarse a esos planetas. Nuestro equipo del UCL demostró que esos sistemas podían ampliarse para incorporar también las relaciones de período de los planetas. Esa idea habría permitido a los constructores ensamblar varios engranajes en la misma placa de modo que se ajustaran con precisión a las relaciones de período.

Esos económicos trenes de siete engranajes podían intercalarse de forma intrincada entre las placas que sujetaban los pilares de la rueda motriz de forma que los tubos siguieran el orden cosmológico habitual de los cuerpos celestes (Luna, Mercurio, Venus, Sol, Marte, Júpiter y Saturno), orden que determina también el diseño del sistema de anillos. Los espacios entre las placas tenían las dimensiones exactas para poder acomodar los sistemas con cierto margen, aunque seguían quedando preguntas pendientes.

Por un lado, añadimos un mecanismo para representar el movimiento variable del Sol y, por el otro, uno epicíclico para calcular los «nodos» de la Luna, es decir, los puntos donde la órbita lunar corta el plano de la eclíptica, lo que hace posible que tenga lugar un eclipse. Los eclipses solo se producen cuando el Sol se halla cerca de uno de esos nodos, durante una luna llena o nueva. Los astrónomos medievales y renacentistas llamaban «manecilla del dragón» a un puntero con el extremo bifurcado que señalaba los nodos lunares. El engranaje epicíclico de la manecilla del dragón también explicaba la función de un prominente cojinete de uno de los radios, cuya finalidad se ignoraba hasta entonces. Al fin todas las características de la rueda motriz principal quedaban explicadas, por lo que publicamos nuestras conclusiones en marzo de 2021 en *Scientific Reports*.

Una bella concepción

Hoy por fin comprendemos cómo se corresponden los diales frontales con la descripción recogida en el manual de uso de la cara trasera, de forma que el Sol y los planetas se visualizan con cuentas en un conjunto de anillos concéntricos. En la cubierta delantera también se

visualizaba la fase de la Luna, así como su posición y su edad (el número de días que faltan para la luna nueva). Por otro lado, la manecilla del dragón predecía los años y las estaciones en las que habría eclipses.

Teniendo en cuenta que en los anillos concéntricos se mostraban los planetas, entendimos que también podíamos deducir la finalidad de la inscripción de la cubierta frontal. Se trata de una lista expresada en fórmulas de los eventos sinódicos de cada planeta (como sus conjunciones con el Sol y sus puntos estacionarios) y la cantidad de días que transcurrían entre ellos. En la placa trasera, las inscripciones referentes a los eclipses se asocian mediante índices a las marcas del dial de saros. En la placa frontal, las inscripciones relacionadas con la salida y la puesta de las estrellas se asocian mediante otros índices al dial zodiacal. Según nuestra teoría, las inscripciones frontales podrían hacer referencia a una serie de letras escritas en los anillos planetarios: cuando el puntero solar señalaba una de esas letras, la inscripción correspondiente indicaba el número de días que faltaban hasta el siguiente evento sinódico. Dado que se ha perdido el lateral izquierdo de la inscripción, donde esperaríamos encontrar el listado de letras, no podemos probar esa hipótesis, pero nos parece una explicación convincente.

El instrumento ocupa un lugar único entre los descubrimientos de su época, ya que reescribe por sí solo todo nuestro conocimiento sobre los avances técnicos en la Grecia antigua. Ya sabíamos de lo que eran capaces los griegos: antes de diseñar el mecanismo de Anticitera levantaron el Partenón y el faro de Alejandría. También fabricaban sistemas de cañerías y se servían del vapor para hacer funcionar aparatos. Pero hasta su descubrimiento se creía que los engranajes de la época se limitaban a las rudimentarias ruedas de los molinos de viento y de agua. Dejando a un lado este valioso objeto, el primer mecanismo de engranajes de precisión conocido se encuentra en un reloj solar y calendario de origen bizantino, fechado en torno al año 600 d.C. Se trata de un artefacto relativamente sencillo, aunque asombroso para la época. Y hubo que esperar hasta el siglo XIV para que aparecieran los primeros relojes astronómicos complejos. El mecanismo de Anticitera, con sus engranajes de precisión con dientes de un milímetro de longitud, es completamente diferente a cualquier otro objeto del mundo antiguo.

¿Por qué tuvieron que pasar siglos antes de que se reinventara algo tan complejo? ¿Y por qué no se han descubierto otros mecanismos similares? Tenemos razones fundadas para pensar que el mecanismo de Anticitera no fue el único modelo de su tipo: debió de haber precursores. Pero el bronce era un metal muy preciado, así que cuando un objeto como ese dejaba de funcionar, probablemente se fundía para reaprovecharlo. Los pecios son lugares idóneos para encontrar objetos similares. En cuanto a las razones por las que, aparentemente, los conocimientos técnicos se perdieron durante tanto tiempo antes de resurgir de nuevo, ¿quién sabe? La historia está plagada de lagunas y puede que los descubrimientos futuros nos reserven alguna sorpresa.

En lo que respecta al mecanismo de Anticitera, está claro que no hemos llegado al final de la historia. Creemos que nuestro trabajo supone un avance notable, pero restan algunos interrogantes. En el equipo de investigación del UCL no estamos seguros de que nuestra reconstrucción sea del todo correcta. Es muy difícil reconciliar toda la información que nos ha llegado, pero ahora podemos entender, con más claridad que nunca, el gran logro que representa esta joya.

Tony Freeth forma parte del equipo de investigación del Colegio Universitario de Londres. Matemático y cineasta galardonado, ha estudiado el mecanismo de Anticitera y lo ha dado a conocer en películas y presentaciones desde 2000.



PARA SABER MÁS

http://www.antikythera-mechanism.gr

EN NUESTRO ARCHIVO

El mecanismo de Anticitera. Tony Freeth en *IyC*, febrero de 2010.
En busca de tesoros sumergidos. Philip J. Hilts en *IyC*, agosto de 2015.



EVOLUCIÓN

LOS PRIMEROS SONIDOS DE LA VIDA

Michael B. Habib | La vida en la Tierra permaneció muda durante miles de millones de años: hasta que irrumpieron los animales

ILUSTRACIÓN DE SAM FALCONER

Damos por supuesto que en cualquier confín del globo resuenan los sonidos de la fauna, como el cautivador canto de las ballenas en los mares, las revoltosas melodías de las aves, las ranas y los insectos en los bosques, o el bullicio del ser humano y de sus artefactos en las junglas urbanas. Pero durante la mayor parte de la historia terrestre, los únicos sonidos que surcaban el aire eran los generados por el viento, la lluvia y las olas.

Como paleontólogo, mi labor consiste en descubrir aspectos del modo de vida de los animales extintos: cómo se desplazaban, de qué se alimentaban y los sonidos que pudieron haber proferido. También trabajo como asesor de animación y diseño zoológico para exposiciones, series de televisión, películas y videojuegos. Entre los temas recurrentes que se me pide que acometa en esos proyectos destacan los relacionados con el sonido de los animales. Ya sea en la reconstrucción de unos pterosaurios extintos para un estudio académico o en la concepción de un animal fabuloso para una superproducción, el sonido ocupa un lugar preeminente en el proceso de dar vida a los mundos pretéritos o imaginarios.

En síntesis

Durante la mayor parte de la historia, antes de que aparecieran los animales, los únicos sonidos que había en nuestro planeta eran los generados por el viento, la lluvia y las olas.

El estudio de los fósiles ha permitido deducir en qué momento surgieron los tipos básicos de órganos emisores y receptores del sonido en los animales, desde los insectos hasta los humanos.

Los últimos avances en el campo de la evolución de la acústica animal y la modelización han permitido reconstruir los paisajes sonoros pretéritos y ahondar en el origen de los actuales.

> La conservación en los fósiles de los órganos sonoros ha permitido reconstruir el canto en vida de los antepasados de las cigarras y los grillos

Los últimos avances en el campo de la evolución de la acústica animal nos han permitido ensanchar nuestros conocimientos de cómo se crearon los paisajes sonoros modernos. Los fósiles nos indican en qué momento surgieron los tipos básicos de órganos emisores y receptores del sonido en los antecesores de la fauna invertebrada y vertebrada actual. En algunos casos, una modelización sagaz ha permitido incluso recrearlos. Queda mucho por saber, pero comenzamos a componer el rompecabezas de los primeros sonidos vivientes.

El silencio roto

El registro fósil indica que la vida nació en la Tierra hace 3700 millones de años. Pero aquellos primigenios organismos microbianos y los animales blandos de aspecto similar a una medusa que surgieron mucho más tarde eran un colectivo sigiloso. Hasta la explosión evolutiva acaecida en el período Cámbrico, hace entre 541 y 485,4 millones de años, la fauna no adquiriría ciertos comportamientos sonoros básicos en relación con la locomoción y la depredación. Pero incluso entonces, el silencio bajo el agua, donde habitaban estas criaturas, casi son seguridad solo era interrumpido por el deslizamiento de los pies articulados de los artrópodos sobre la arena o el crujido sordo de una concha al ser triturada por un cefalópodo. Entretanto, la tierra firme permanecía básicamente en silencio. Tuvieron que transcurrir más de 200 millones de años antes de que el zumbido de los insectos comenzase a resonar en el aire, dando pie a un mundo acústico del todo nuevo.

El insecto más antiguo conocido tiene 408 millones de años de antigüedad y es posible que fuera sordo y sigiloso. No se sabe con exactitud en qué momento comenzaron los insectos a emitir o escuchar sonidos, pero el registro fósil ofrece una fecha mínima: un grillo de hace 250 millones de años, del Pérmico superior, ya poseía la peculiar anatomía «sonora» propia de su grupo. Los primeros antepasados fósiles de

las cigarras datan de aquella misma época. Estos insectos producían sonidos estridentes mediante la rápida contracción y relajación de unas membranas quitinosas alojadas en el abdomen, llamadas timbales. Esos antiguos órganos sonoros han quedado tan bien conservados en algunos especímenes fósiles que ha sido posible reconstruir el canto en vida de dichos insectos. En 2011, un equipo encabezado por Jun-Jie Gu, ahora en la Universidad de Agricultura de Sichuán, dedujo que un grillo primitivo emitía sonidos en la frecuencia de 6,4 kilohercios, que equivale más o menos a una octava más alta que la nota más aguda registrada de Mariah Carey.

La facultad de emitir y escuchar sonidos debió de brindar multitud de ventajas a aquellos primeros insectos zumbantes: hizo posible la comunicación a distancia, escuchar a los depredadores y, tal vez, tender trampas a las presas imitando el sonido de su pareja. Además, ofreció una nueva modalidad de cortejo que desató una competición biológica hasta entonces desconocida: la carrera por el reclamo más potente.

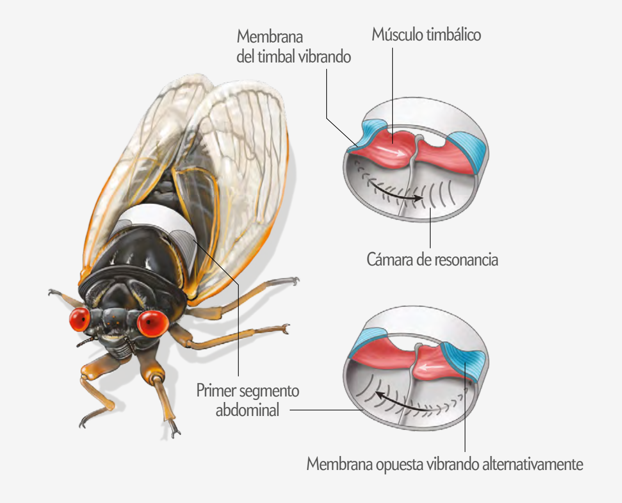
Los vertebrados probablemente empezaron a experimentar de forma tímida con el sonido en la misma época en que los insectos comenzaban a zumbar y estridular. Los anfibios, los reptiles y los mamíferos actuales poseen laringe, situada cerca del extremo superior de la tráquea. Esto indica que la heredaron de su último antepasado común, lo que quiere decir que es casi tan antigua como los mismos vertebrados terrestres, pues se remonta en torno a 300 millones de años. Con todo, es probable que los órganos verdaderamente especializados y las vocalizaciones potentes no surgieran en ellos hasta varios millones después. Poco se sabe de las primeras etapas de la vocalización de los vertebrados, entre otras razones porque la laringe está formada por cartílago, que en general no fosiliza.

Lo que sabemos es que hace unos 230 millones de años, en el curso de la era Mesozoica, los vertebrados adquirieron una amplia gama de aptitudes vocales. El mundo devino un lugar muy ruidoso. Entre otros artífices, las ranas, con su rico repertorio de cantos y reclamos, surgieron en el Mesozoico. Los mamíferos también hicieron acto de aparición en torno a esa época, y seguramente no tardaron en producir sus característicos chirridos, gruñidos y siseos. Si bien no disponemos de muchos indicios directos del aparato fonador de los mamíferos primigenios, contamos con un interesante registro fósil del aparato auditivo. El oído de los mamíferos es único, provisto como está de tres diminutos huesecillos alojados en el segmento medio, dos de los cuales derivan de huesos que en la mayoría de los demás vertebrados integran la mandíbula. Ese peculiar oído percibe bastante bien los tonos agudos o de alta frecuencia, lo que pudo ayudarles a atrapar a los insectos en vuelo. Estos mamíferos también podrían haber sido capaces de proferir sonidos de alta frecuencia, facilitando la comunicación en una gama de frecuencias que muy pocos animales podían percibir.

Entre la fauna del Mesozoico mejor dotada acústicamente destacan los dinosaurios. David Weishampel llevó a cabo en 1981 una de las primeras reconstrucciones de la voz de una especie fósil, *Parasaurolophus*, un dinosaurio de pico de pato herbívoro. Este lucía una cresta prominente en la cabeza que estaba conectada con el aparato respiratorio. Weishampel demostró que la cresta era una soberbia cámara de resonancia. A partir de las dimensiones y de la forma, fue capaz de inferir el repertorio sonoro de *Parasaurolophus* y de reproducirlo con un modelo construido por él mismo. (Hasta hoy se refiere con afecto a esa estructura como «bocina».)

TIMBALES

El canto de las cigarras y los grillos tiene su origen en unos órganos membranosos llamados timbales. La rápida contracción y relajación de las membranas genera potentes vibraciones. El registro fósil muestra que los timbales surgieron hace unos 250 millones de años.



GRÁFICOS DE MESA SCHUMACHER

La aparición de herramientas digitales cada vez más refinadas ha hecho posible este análisis minucioso en muchos más especímenes. Desde 2008, el equipo de Larry Witmer, en la Universidad de Ohio, ha recurrido a las tomografías computarizadas y a la modelización con mecánica de fluidos para evaluar la producción sonora en varios tipos de dinosaurios. Así han descubierto que el cráneo de muchos albergaba cavidades complejas. El aire impulsado a través de esas cámaras habría seguido un camino tortuoso. La corriente habría ayudado a regular la temperatura del cuerpo, pero al mismo tiempo, les habría permitido proferir una amplia gama de sonidos, tales como vozneos, bramidos o trompeteos.

La reconstrucción de las vocalizaciones de los dinosaurios es uno de los pilares de la industria cinematográfica desde hace décadas. Los bramidos que escuchamos en películas como *Parque Jurásico* figuran entre las representaciones más célebres de los sonidos de animales extintos. Julia Clarke, de la Universidad de Texas en Austin, y sus colaboradores plantearon que los sonidos de los dinosaurios carnívoros como *Tyrannosaurus rex* recordarían más a los de las aves que a los de los mamíferos. Tal y como algunos periodistas han afirmado, los temibles tiranosaurios pudieron dar «bocinazos» antes que «rugidos». Pero antes de que comencemos a retratar a *T. rex* como una suerte de ganso gigantesco, vale la pena aclarar lo que los investigadores entienden por «vozneo» desde el punto de vista de la biomecánica: un sonido emitido mayormente a través de las fosas nasales más que de la cavidad bucal, que arranca con la vibración de estructuras internas del tórax. Trasladado a la escala de un tiranosaurio, ese bocineo debió convertirse en una atronadora trompa de guerra de bajo-barítono que resonaría con la fuerza de toda la sección de viento-metal de una orquesta filarmónica a pleno pulmón, antes de embestir armado con sus fauces trituradoras de dos metros.

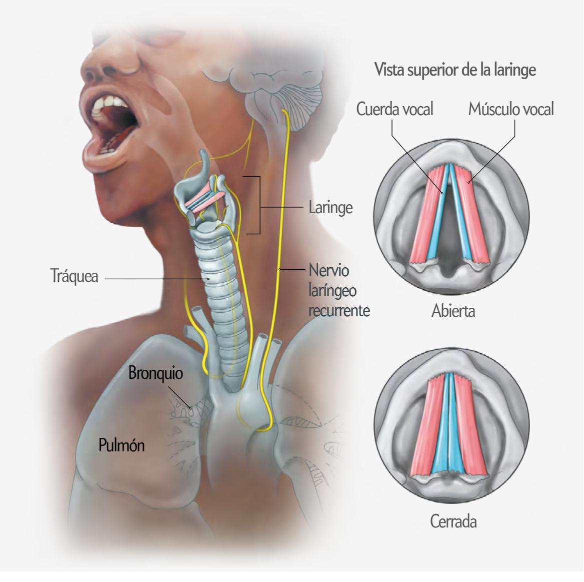
Con todo, algunos dinosaurios seguramente eran bastante más sigilosos de lo que solemos ver representado. En *Parque Jurásico*, los braquiosaurios de cuello largo bramaban como elefantes, pero en realidad es posible que fueran casi mudos. A lo sumo debieron ser capaces de proferir siseos. En los tetrápodos, grupo al que pertenecen los primeros vertebrados terrestres y sus descendientes, el control de las vocalizaciones primarias de la laringe reside sobre todo en el nervio laríngeo recurrente. Este siempre muestra la misma disposición inusual: desciende por el cuello y circunda varios vasos sanguíneos de gran calibre del tórax intermedio y superior antes de ascender de nuevo hasta la laringe. Como consecuencia, los impulsos nerviosos de la voz han de recorrer cerca del doble de la longitud del cuello.

En el ser humano y en los animales cuellicortos, la demora que esto provoca en la transmisión de los impulsos es trivial, pero en un gigantesco dinosaurio cuellilargo debió ser enorme, tanto que, de hecho, le resultaría imposible controlar correctamente las rápidas vibraciones de las cuerdas vocales que requieren las vocalizaciones complejas, como el vozneo o el trompeteo. La próxima vez que vea *Parque Jurásico*, imagine que los hadrosaurios bocineaban, los tiranosaurios trompeteaban y los braquiosaurios siseaban.

Aun así, con toda seguridad, muchos dinosaurios debieron ser vocalistas impresionantes.

LARINGE

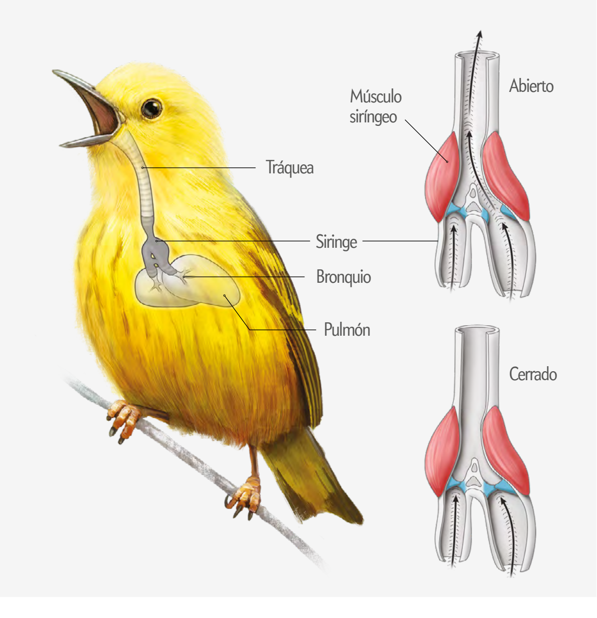
Los mamíferos, los reptiles y los anfibios actuales poseen laringe, el órgano fonador con el que emiten una amplia gama de sonidos. Esta alberga las cuerdas vocales y es controlada básicamente por el nervio laríngeo recurrente. No suele quedar conservada en los fósiles porque está formada por cartílago, pero su presencia en todos los vertebrados terrestres actuales nos indica que es una herencia del último ancestro común, de hace quizá 300 millones de años.



GRÁFICOS DE MESA SCHUMACHER

SIRINGE

Las aves desarrollaron un órgano fonador llamado siringe con el que emiten sus complejos cantos y reclamos. Situada en la base de la tráquea, donde esta se bifurca en los bronquios principales que se adentran en los pulmones, gracias a ella emiten sonidos más potentes con el mismo coste energético. La siringe también es capaz de controlar de modo independiente el flujo aéreo del pulmón izquierdo y del derecho y emitir así sonidos distintos. Los fósiles aviares más antiguos tienen 150 millones de años, pero los órganos vocales especializados pudieron surgir después.



Pero otro grupo en concreto desarrolló algunas de las vocalizaciones más elaboradas del reino animal. Sus miembros son coetáneos a nosotros: las aves. Los especímenes aviares más antiguos se han descubierto en yacimientos datados en torno a 150 millones de años, si bien sus peculiares habilidades vocales pudieron aparecer tiempo después.

Las aves poseen un órgano fonador especial, la siringe. Su laringe es pequeña, de modo que la siringe asume casi la mitad del control vocal. La laringe está ubicada en la parte superior de la tráquea, en tanto que la siringe radica en la base, donde la tráquea se bifurca en los bronquios principales, que se internan en los pulmones. Esa ubicación ofrece varias ventajas. Una de las mayores, descrita en 2019 por Tobias Riede, de la Universidad Midwestern, y sus colaboradores es que multiplica la resonancia. En otras palabras, genera un sonido más potente con el mismo coste energético. Otra ventaja es que la siringe puede canalizar y controlar los flujos de aire procedentes del pulmón derecho y del izquierdo por separado. Las aves canoras son especialmente diestras en este arte; generan los sonidos de cada lado de forma simultánea o independiente. En ciertos casos, ambos lados están especializados en gamas de frecuencia distintas, lo que abre la posibilidad de interpretar duetos internos. El hermoso canto del zorzalito colirrufo (*Catharus guttatus*) es un ejemplo de ello.

Todavía no se tienen conocimientos sólidos acerca del origen de la siringe. La más antigua descubierta hasta la fecha corresponde a la de un espécimen de la extinta *Vegavis*, descrita en 2016 por Clarke y sus colaboradores. *Vegavis* vivió en las postrimerías del Cretácico, hace entre 66 y 69 millones de años. Aun así, su siringe ya estaba bastante especializada, con una cavidad de resonancia amplia y asimétrica asociada a la producción bilateral de sonidos. Una versión más primitiva de este órgano pudo haber surgido antes.

Curiosamente, los otros vertebrados voladores del Mesozoico, los pterosaurios, carecían de siringe. Así que, al contrario de lo que las películas de Hollywood pretenden hacernos creer, su voz no se parecía a la de las aves. Lo más probable es que recordasen a las de otros reptiles: gruñidos, siseos, chasquidos e incluso tableteos, estos últimos producidos abriendo y cerrando el pico con celeridad. Con un cráneo de tres metros de largo, el crotoreo de un pterosaurio gigante debió de ser ensordecedor a distancias cortas.

Ver con el sonido

Con la llegada del Cenozoico, hace 66 millones de años, nació un modo radicalmente distinto de captar el mundo a través del sonido: la ecolocación. Los murciélagos y los cetáceos surgieron a inicios de esta era y ambos grupos desarrollaron esa capacidad para «ver» con el sonido. La ecolocación exige una anatomía bastante compleja, pues es preciso que el animal genere un haz de ondas sonoras, lo enfoque en la dirección deseada, capte los ecos y los procese para calcular la distancia, la velocidad y la forma general del objeto, sea cual sea. Es un gran recurso de orientación y de caza en el cielo nocturno o en las aguas turbias.

Al igual que sucede con la luz, el tamaño del objeto más pequeño detectable con la ecoloca-

GRÁFICOS DE MESA SCHUMACHER

ción es igual a la mitad de la longitud de onda del haz sonoro. Ahora bien, esta es mucho más grande en las ondas sonoras que en las lumínicas, así que para obtener una imagen decente del entorno o detectar insectos minúsculos, el emisor ha de proyectar sonidos de una frecuencia ultraalta, cuya longitud de onda es más corta que la de los sonidos de frecuencia baja. En los murciélagos, esas vocalizaciones, que son producidas por la laringe y la lengua, normalmente son tan agudas que resultan imperceptibles para el oído humano. A lo sumo, nuestro oído capta las frecuencias de 20.000 hercios, mientras que los chillidos de los murciélagos abarcan desde los 15.000 hasta unos asombrosos 160.000 hercios. Solo podemos aspirar a oír sus frecuencias más bajas, que escuchamos como chillidos agudos, aunque para ellos sean el equivalente a una voz de bajo-barítono.

Sabemos en qué momento aproximado adquirieron la capacidad de ecolocación gracias a rasgos de la anatomía auditiva que se han conservado en los fósiles. Para escuchar los ecos ultrasónicos, precisan de un oído interno desmesurado para su talla. El mayor elemento auditivo del cráneo es la cóclea, o caracol. Las dos cócleas humanas caben holgadamente en una moneda de diez céntimos de euro; si tuviesen el mismo tamaño relativo que la de un quiróptero, tendrían el diámetro de una pelota de golf. *Icaronycteris index*, descubierto en el oeste de Wyoming en estratos de 50 millones de años, es uno de los primeros fósiles conocidos del orden, y su cráneo ya presenta rasgos propios de la ecolocación por ultrasonidos que también poseen las especies actuales.

La aparición de la ecolocación en los quirópteros supuso una gran revolución ecológica: desde ese momento los vertebrados pudieron atrapar insectos en vuelo en la noche cerrada. Al cabo de 240 millones de años, estos ya no tuvieron escondite posible. Y gracias a esa innovación, los murciélagos han florecido: hoy constituyen cerca de una cuarta parte de todos los mamíferos, y si bien algunos dependen en exclusiva de la visión para cazar, la mayoría practica la localización a través del sonido.

La ecolocación funciona en el agua tanto o mejor que en el aire, pues en ciertos aspectos el líquido elemento se presta aún mejor a la detección de objetos por medio del sonido reflejado. En el agua la energía sónica se disipa mucho menos con la distancia que en la atmósfera, de modo que los ecolocalizadores acuáticos gozan de un alcance mayor que sus homólogos aéreos. Los sonidos agudos (frecuencias altas) no llegan muy lejos si se comparan con los graves (frecuencias bajas), pero, aun así, algunos delfines son capaces de distinguir objetos desde 200 metros, una distancia nada desdeñable. En contraste, un murciélago no puede localizar ningún objeto que diste más de 50 a 90 metros y, si se trata de un insecto diminuto, el alcance es mucho más limitado.

La ecolocación funciona en el agua tanto o mejor que en el aire, pues en ciertos aspectos el líquido elemento se presta aún mejor a la detección de objetos por medio del sonido reflejado

Los delfines marinos, como el conocido delfín mular (*Tursiops truncatus*), se sirven de la ecolocación para echar un «vistazo» a gran distancia en las aguas oscuras o turbias. Los delfines fluviales, como los que habitan en el río Amazonas, aprovechan aún mejor esa facultad. Las aguas oscuras donde nadan son excepcionalmente opacas. En comparación con otros cetáceos, poseen ojos pequeños y una agudeza visual reducida, por lo que parecen depender en gran medida de las ondas sonoras para desenvolverse en el medio y buscar alimento.

Los anteriores no son los únicos registros sonoros de los mamíferos marinos. Si la cuestión es emitir un sonido que viaje lo más lejos posible sin que importe escuchar el eco, entonces lo mejor es emitir sonidos de frecuencia ultrabaja. Y para esto, los animales acuáticos de grandes dimensiones gozan de una ventaja natural. No resulta sorprendente, pues, que las campeonas

del largo alcance sean las grandes ballenas. Con una laringe de hasta 60 centímetros de longitud y reclamos tan graves que son inaudibles para el ser humano, el canto de algunas recorre cientos y posiblemente miles de kilómetros bajo el agua. Entre los murciélagos y las ballenas, el mundo es aún más ruidoso de lo que podíamos imaginar.

La revolución del lenguaje

Unos 230 millones de años después de que los sonidos de los mamíferos primigenios comenzasen a resonar en el planeta, la vocalización asumió una nueva función con la aparición del lenguaje humano. Los requisitos anatómicos que exige el lenguaje, como una laringe rápidamente ajustable y una primorosa coordinación de esta con la lengua, parecen remontarse por lo menos al origen del género *Homo*. Esto significa que los antepasados de la especie humana ya poseerían algún tipo de habla hace 2,8 millones de años. Sin embargo, todavía se debate sobre qué especies de *Homo* comenzaron por primera vez a comunicarse a través del verbo y cuándo lo hicieron.

El lenguaje no surgió solo gracias a la anatomía que posibilita el habla, sino también por la adquisición del pensamiento simbólico. La mayoría de los modelos indican que *Homo erectus*, aparecido hace alrededor de 1,8 millones de años, fue el primer antepasado que empleó símbolos. Pero el lenguaje humano plenamente desarrollado, con las complejas reglas de gramática y sintaxis, podría ser exclusivo de nuestra especie, lo que significa que debió surgir en los últimos cientos de miles de años.

No es la mera posesión del lenguaje lo que nos hace tan poderosos: la singularidad del ser humano estriba en su capacidad para enseñarlo, aprenderlo y registrarlo. Se ha conseguido que otros primates aprendan a usar el lenguaje de los signos, pero ninguno ha transmitido esa habilidad a otros congéneres, aunque haya tenido la oportunidad. En una ocasión, un chimpancé del laboratorio de primatología de la Universidad Duke que lo había aprendido fue reintegrado en su grupo originario. Intentó comunicarse con sus antiguos compañeros por ese medio, pero al cabo de una semana los cuidadores lo hallaron apartado en un rincón del recinto. Cuando se le preguntó con signos por qué no estaba con los demás, respondió: «Porque son insectos».

El lenguaje no surgió solo gracias a la anatomía que posibilita el habla, sino también por la adquisición del pensamiento simbólico

El lenguaje humano es uno de los atributos biológicos de mayor trascendencia que jamás han existido. La formación de nuestros grupos sociales y de nuestras sociedades y civilizaciones se fundamenta en él. Gracias a la coordinación de esfuerzos que posibilita, hemos ideado casi todo, desde la agricultura hasta las lanzaderas espaciales, avances técnicos que por sí solos contribuyen al paisaje sonoro contemporáneo. Nuestros sonidos no fueron los primeros, ni son los más potentes ni los más melodiosos del reino animal, pero en cierta manera son los que más han transformado el mundo.

Michael B. Habib, es paleontólogo y especialista en biomecánica del Museo de Historia Natural de Los Ángeles y de la Asociación del Parque Zoológico de esa ciudad. Estudia la anatomía y la locomoción de los pterosaurios, las aves y los dinosaurios emplumados.



EN NUESTRO ARCHIVO

¿Es sincero el canto de las aves? William A. Searcy y Stephen Nowicki en *IyC*, agosto de 2008.
La batalla evolutiva acústica. William E. Conner en *IyC*, febrero de 2014.
Hablar a través del tiempo. Christine Kenneally en *IyC*, noviembre de 2018.



FÍSICA CUÁNTICA

EL TIEMPO DE LA MECÁNICA BOHMIANA

Anil Ananthaswamy | Medir el tiempo que tardan las partículas en viajar entre dos puntos permitiría poner a prueba la teoría de Bohm, una alternativa a la mecánica cuántica

ILUSTRACIÓN DE KENN BROWN, MONDOLITHIC STUDIOS

Un experimento engañosamente simple que consiste en medir de forma precisa el tiempo que tarda una partícula en ir de un punto a otro amenaza con provocar una revolución en la física cuántica. Tales mediciones podrían poner en el punto de mira una formulación alternativa de la teoría cuántica, según la cual existe un submundo de ondas invisibles que guían a las partículas cuando se desplazan.

Un grupo de investigadores de la Universidad Ludwig Maximilian de Múnich (LMU) ha hecho predicciones para los resultados de ese experimento usando la mecánica bohmiana, formulada por el físico teórico David Bohm en la década de 1950 y más tarde ampliada por otros científicos. Mientras, la teoría cuántica habitual requiere hipótesis y aproximaciones para calcular los tiempos de tránsito. Según Serj Aristarhov, físico teórico y miembro del equipo de la LMU, «si la gente supiera que una teoría tan popular como la mecánica cuántica estándar no puede hacer predicciones [precisas] en un caso tan simple, eso debería al menos darles que pensar».

No es ningún secreto que el mundo cuántico es extraño. Consideremos un cañón que envía electrones contra una pantalla, como en el experimento de la doble rendija. No es posible saber a qué lugar de la pantalla llegará un electrón dado. Lo que sí podemos predecir con precisión es la distribución espacial (el patrón) de los puntos luminosos que se formarán en ella a medida que los electrones vayan golpeándola. Algunas partes recibirán más electrones y otras menos. Y aún hay más: en las mismas condiciones, cada electrón tardará un tiempo ligeramente distinto en alcanzar el detector. Como ocurre con las posiciones, esos «tiempos de llegada» poseen una distribución, de modo que algunos valores serán más frecuentes que otros. Sin embargo, la física cuántica que presentan los libros de texto no dispone de ningún método para predecir esta distribución temporal. «La mecánica cuántica normal solo se preocupa del "dónde" e ignora el "cuándo"», recalca el físico teórico y miembro del equipo Siddhant Das. «Ese es un síntoma de que algo no va bien.»

No obstante, hay una razón profunda para esa limitación. En física cuántica, cualquier propiedad que podamos medir (como la posición de una partícula) constituye un «observable», y cada observable tiene asociado un objeto matemático denominado operador. Pero la mecánica cuántica estándar no posee ningún operador para medir el tiempo. De hecho, no permite definir uno (al menos no de la manera habitual), como demostró en 1933 el físico teórico austríaco Wolfgang Pauli: «Concluimos, pues, que la introducción de un operador de tiempo debe abandonarse a nivel fundamental», escribió.

Pese a todo, la medida de los tiempos de llegada, o «tiempos de vuelo», es importante en física experimental. Los detectores del Gran Colisionador de Hadrones del CERN o los espectrómetros de masas usan tales mediciones para calcular la masa y el momento de partículas fundamentales, iones y moléculas. Pero hay un problema: aunque los cálculos se refieren a un sistema cuántico, no pueden realizarse usando la mecánica cuántica sin más aditamentos, sino que es necesario formular hipótesis. Por ejemplo, uno puede asumir que, tras abandonar la fuente, la partícula se comporta de manera clásica y obedece las ecuaciones de movimiento de Newton.

El resultado es una estrategia híbrida, en parte clásica y en parte cuántica. Se comienza con una visión cuántica, donde cada partícula viene representada por una abstracción matemática conocida como función de onda. Las partículas preparadas de modo idéntico tendrán funciones de onda idénticas al abandonar la fuente. Pero si midiésemos el momento (o la posición) de esas partículas en el instante en que se emiten, hallaríamos valores distintos para cada una de ellas. Combinándolos, obtendríamos una distribución que queda determinada con precisión por la función de onda inicial. Así, si partimos de ese

En síntesis

Si lanzamos partículas idénticas contra un detector, cada una tardará un tiempo ligeramente distinto en llegar a él. Predecir la distribución de esos tiempos de vuelo mediante la mecánica cuántica exige hacer hipótesis problemáticas.

Además, en ciertos casos, esas predicciones difieren notablemente de las obtenidas a partir de la mecánica bohmiana, una formulación alternativa de la teoría cuántica donde las partículas siguen trayectorias bien definidas.

Una propuesta experimental reciente permitiría discriminar entre los tiempos de vuelo predichos por la física cuántica estándar y por la mecánica bohmiana, lo cual arrojaría luz sobre los fundamentos de la teoría cuántica.

Posiciones y tiempos de llegada

El experimento de la doble rendija consiste en lanzar electrones (u otras partículas) contra una pantalla opaca con dos aberturas, de modo que los electrones que las atraviesan impactan contra un detector y producen puntos fosforescentes. Cabría esperar que esos puntos se concentraran frente a cada rendija, pero eso no es lo que ocurre, sino que poco a poco emerge un patrón de interferencia: hay más puntos luminosos en las regiones con interferencia constructiva y menos o ninguno allí donde es destructiva. Y eso sucede incluso si enviamos los electrones uno a uno, ya que cada electrón actúa como una onda que pasa a la vez por ambas rendijas. El patrón de interferencia surge al enviar varios electrones.

LA DISTRIBUCIÓN DE LAS POSICIONES DE LLEGADA SE CONOCE BIEN

Lo que atraviesa las rendijas es la función de onda de la partícula, una abstracción matemática que representa su estado cuántico. Imaginemos una onda que se divide en dos partes, cada una de las cuales se propaga desde una rendija e interfiere con la otra parte. Esas componentes de la función de onda pueden sumarse o cancelarse en el detector. Los picos y valles de la función de onda combinada dan la probabilidad de detectar el electrón en una posición dada, y la distribución espacial de las partículas en el detector se ajusta a las predicciones teóricas.

LA VARIABLE TEMPORAL SE ENTIENDE MUCHO MENOS

No solo es imposible predecir en qué punto del detector aterrizará una partícula dada, sino que tampoco hay forma de saber cuándo llegará. En el caso de las posiciones, al menos podemos calcular cómo se distribuyen en el plano del detector para un conjunto de partículas idénticas. Pero la mecánica cuántica estándar no permite hacer lo mismo con los «tiempos de llegada», los instantes precisos en que las distintas partículas alcanzan el detector. No es posible calcular la distribución de los tiempos de llegada sin hacer hipótesis problemáticas.

NICK BOCKELMAN

conjunto de valores del momento para partículas preparadas de forma idéntica y asumimos que estas siguen una trayectoria clásica una vez emitidas, obtenemos una distribución de tiempos de llegada al detector que depende de la distribución inicial de momentos.

La teoría cuántica canónica también permite calcular los tiempos de llegada de otra manera. Mientras una partícula vuela hacia el detector, su función de onda evoluciona según la ecuación de Schrödinger. Consideremos el caso unidimensional de un detector situado a cierta distancia horizontal de la fuente emisora. La ecuación de Schrödinger determina la función de onda de una partícula, y por tanto la probabilidad de detectarla en una posición dada, suponiendo que la partícula pasa una sola vez por esa posición. Bajo esa hipótesis (que, por supuesto, no hay forma de comprobar en la mecánica cuántica habitual), los físicos pueden calcular la probabilidad de que la partícula llegue al detector en cierto tiempo t o antes. «Desde el punto de vista de la mecánica cuántica estándar, todo esto parece perfectamente correcto», señala Aristarhov, «y uno espera obtener una respuesta adecuada».

Un resultado experimental claro podría sacudir los cimientos de la mecánica cuántica

Pero hay un problema. Para pasar de la probabilidad de que el tiempo de llegada sea igual o menor que t a la probabilidad de que sea exactamente igual a t hay que calcular una cantidad que los físicos llaman flujo cuántico (o corriente de probabilidad), que da una medida de cómo cambia con el tiempo la probabilidad de encontrar una partícula en un punto del detector. Y eso funciona bien, con la excepción de que a veces el flujo cuántico puede ser negativo. Aunque es difícil encontrar una función de onda donde eso ocurra de manera apreciable, nada «prohíbe que esa cantidad sea negativa», explica Aristarhov, «y eso es desastroso». Un flujo cuántico negativo conduce a probabilidades negativas, lo cual no tiene sentido.

Usar la ecuación de Schrödinger para calcular la distribución de tiempos de llegada solo es posible si el flujo cuántico es positivo. Y, en el mundo real, solo podemos asegurar que eso se cumple si el detector está en el «campo lejano» (a una distancia considerable de la fuente) y la partícula se mueve libremente, sin la influencia de un potencial. En esas condiciones, tanto el método híbrido como el del flujo cuántico arrojan predicciones similares para los tiempos de llegada, que además concuerdan con los resultados experimentales. Pero esos métodos no proporcionan pronósticos claros en el régimen de «campo cercano», cuando el detector está muy próximo a la fuente.

Predicciones bohmianas

En 2018, Das, Aristarhov y Detlef Dürr, experto en mecánica bohmiana de la LMU fallecido en 2021 y que por entonces era el director de tesis de ambos, comenzaron a trabajar con otros colegas en la predicción de los tiempos de llegada a partir de la mecánica bohmiana. La teoría de Bohm mantiene que cada partícula está guiada por su función de onda. En la mecánica cuántica habitual, la posición y el momento de una partícula no están definidos hasta que los medimos, de modo que no puede hablarse de trayectoria. En cambio, en la mecánica bohmiana, las partículas son «reales» y siguen enrevesadas trayectorias descritas por ecuaciones de movimiento precisas (aunque diferentes de las de Newton).

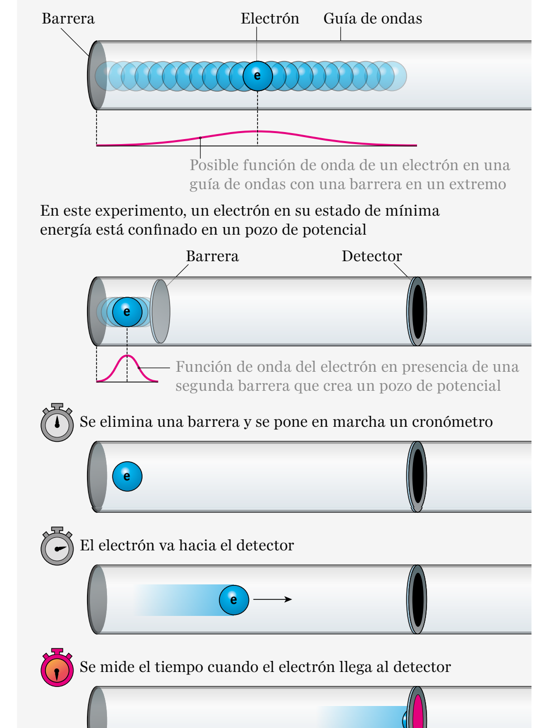
Uno de los primeros hallazgos de los investigadores fue que las medidas de campo lejano no pueden distinguir entre las predicciones de la mecánica bohmiana y las del método híbrido o el basado en el flujo cuántico. La razón es que, para distancias grandes, las trayectorias bohmianas resultan ser líneas rectas, de modo que la aproximación semiclásica híbrida es válida. Asimismo, para trayectorias rectilíneas en régimen de campo lejano, el flujo cuántico es siempre positivo y la mecánica bohmiana predice su valor exacto. Como afirma Aristarhov, «si ponemos un detector lo bastante lejos y realizamos un análisis bohmiano, vemos que coincide con el método híbrido y el del flujo cuántico».

Así pues, la clave radica en hacer mediciones de campo cercano, pero eso es algo que se cree imposible desde hace tiempo. «El régimen de

Medir los tiempos de llegada

Las predicciones de los tiempos de llegada varían según la interpretación de la mecánica cuántica que consideremos. Medir de forma precisa el momento exacto en que una partícula dada llega al detector no es tarea fácil, pero un nuevo experimento debería servir para comprobar esas predicciones.

Cada partícula está representada por su función de onda, una abstracción matemática que permite calcular, por ejemplo, la probabilidad de hallar la partícula en una posición dada.



El experimento se repite muchas veces para generar una distribución de tiempos de llegada

La distribución depende de la dirección del «vector de espín» de la función de onda de la partícula. Cuando ese vector es perpendicular al eje del cilindro, la predicción del tiempo de llegada puede diferir mucho para las distintas teorías.

Distribución teórica de los tiempos de llegada

Probabilidad
Alta
Baja
Mecánica bohmiana
Método híbrido semiclásico
Tiempo de llegada

campo cercano es muy volátil, muy sensible a la forma inicial de la función de onda», explica Das. Además, «si nos situamos muy cerca de la región donde se prepara el estado inicial, detectaremos la partícula de forma instantánea. No es posible resolver [los tiempos de llegada] para discriminar entre una predicción y otra».

Para sortear ese obstáculo, Das y Dürr propusieron un montaje experimental que permitiría detectar las partículas muy lejos de la fuente y cuyos resultados seguirían sirviendo para ditinguir entre las predicciones de la mecánica bohmiana y las de los métodos más habituales.

Conceptualmente, la propuesta es simple. Imaginemos una guía de ondas, es decir, una estructura cilíndrica que confina el movimiento de una partícula. (Por ejemplo, una fibra óptica es una guía de ondas para fotones.) En un extremo de la guía preparamos una partícula en su estado fundamental —el de energía más baja— y la atrapamos en un pozo de potencial eléctrico con forma de cuenco. Ese pozo surge al combinar dos barreras de potencial adyacentes. Si eliminamos una de ellas, la partícula seguirá bloqueada por la otra, pero podrá escapar del pozo a través de la guía de ondas.

Das acometió la laboriosa tarea de determinar los parámetros experimentales, realizando cálculos y simulaciones para hallar la distribución teórica de los tiempos de llegada a un detector situado en el eje de la guía de ondas y lejos de la fuente. Tras años de trabajo, obtuvo resultados claros para dos funciones de onda iniciales distintas, correspondientes a partículas como los electrones. Cada función de onda está caracterizada por su «vector de espín», que podemos visualizar como una flecha asociada a la función de onda y que puede apuntar en cualquier dirección. Los investigadores estudiaron dos casos: uno en el que la flecha apuntaba a lo largo del eje de la guía de ondas y otro en el que era perpendicular a ese eje.

El equipo demostró que si el vector de espín está alineado con el eje de la guía de ondas, el método del flujo cuántico y la mecánica bohmiana predicen la misma distribución de tiempos de llegada, pero la calculada mediante el método híbrido difiere sensiblemente.

Cuando el vector de espín es perpendicular, las discrepancias son aún más marcadas. Con ayuda de su colega de la LMU Markus Nöth, los investigadores hallaron que todas las trayectorias bohmianas llegarán al detector antes de cierto tiempo límite, algo que Das califica de «totalmente inesperado». De nuevo, las predicciones bohmianas difieren significativamente de las calculadas con la teoría semiclásica, que no muestran un tiempo máximo de llegada. Más crucial aún es que en este escenario el flujo cuántico es negativo, por lo que resulta imposi-

JEN CHRISTIANSEN

ble determinar los tiempos de vuelo usando la ecuación de Schrödinger. En general, los físicos cuánticos «se dan por vencidos cuando [el flujo] se hace negativo», indica Das. Pero la mecánica bohmiana sigue pudiendo hacer predicciones, por lo que Aristarhov subraya que «hay una diferencia clara entre ella y todo lo demás».

Los experimentales entran en liza

Charis Anastopoulos, físico cuántico teórico de la Universidad de Patras ajeno al trabajo y experto en tiempos de llegada, se muestra a la vez impresionado y cauto. «El montaje experimental que proponen parece viable», admite. Dado que cada método para calcular la distribución de tiempos de llegada se basa en una manera distinta de abordar la realidad cuántica, un resultado experimental claro podría sacudir los cimientos de la mecánica cuántica. «Reivindicaría una forma concreta de pensar», afirma Anastopoulos, «así que tendría un cierto impacto... Por supuesto, si [concordase con] la mecánica bohmiana, que ofrece una predicción muy característica, ese impacto sería grande».

Hay al menos un físico experimental que se está preparando para materializar la propuesta de los investigadores. Antes de su muerte, Dürr había hablado con Ferdinand Schmidt-Kaler, de la Universidad Johannes Gutenberg de Maguncia, sobre la manera de estudiar los tiempos de llegada. Schmidt-Kaler es un experto en un tipo de trampas de iones que usan campos eléctricos para confinar un ion de calcio. Una red de láseres enfría el ion y lo lleva a su estado fundamental, donde las incertidumbres en su posición y momento son mínimas. La trampa es una región tridimensional con forma de cuenco creada por la combinación de dos potenciales eléctricos, y el ion se sitúa en el fondo de ese potencial «armónico». Al eliminar uno de los potenciales se dan unas condiciones similares a las de la propuesta teórica: a un lado hay una barrera, y al otro, un potencial eléctrico descendente. Por lo tanto, el ion se mueve a lo largo de esa pendiente y se acelera. «Es posible situar un detector fuera de la trampa y medir el tiempo de llegada», explica Schmidt-Kaler. «Por eso es tan atractivo.»

Por el momento, su grupo ha realizado experimentos donde un ion es expulsado de la trampa y se detecta fuera. Los resultados, que demuestran que el tiempo de vuelo depende de la función de onda inicial de la partícula, se publicaron en 2021 en *New Journal of Physics*. Schmidt-Kaler y sus colaboradores también han llevado a cabo pruebas, aún no publicadas, en las que el ion abandona la trampa, se refleja en un «espejo eléctrico» y vuelve a ser capturado. El montaje logra completar este proceso con una eficacia del 98 por ciento, según Schmidt-Kaler. «Es un trabajo en curso», explica. «Por supuesto, [el experimento] no está ajustado para optimizar la medida de la distribución de tiempos de llegada, aunque es algo que podría hacerse.»

Pero conseguirlo no es tan sencillo. El detector situado fuera de la trampa de iones seguramente será una lámina de luz láser, y el equipo tendrá que medir su interacción con el ion con una precisión de nanosegundos. También habrá que eliminar la mitad del potencial armónico con una precisión temporal similar, lo que supone otro reto importante. Estos y otros escollos son habituales al pasar de las predicciones teóricas a los experimentos.

Aun así, Schmidt-Kaler está ilusionado con la perspectiva de usar medidas de los tiempos de vuelo para verificar los fundamentos de la mecánica cuántica. Ese método «tiene el atractivo de ser muy diferente a otras comprobaciones. Es algo realmente nuevo», explica. «Habrá que realizar muchas iteraciones, aunque espero que podamos ver los primeros resultados el próximo año.» Mientras, Aristarhov y Das buscan despertar el interés de otros investigadores. «Tenemos la firme esperanza de que los físicos experimentales de todo el mundo se fijen en nuestro trabajo», apunta Aristarhov. «Aunaremos fuerzas para realizar los experimentos.»

Las palabras finales de un artículo en el que participó Dürr antes de su muerte y que aún no se ha publicado casi podrían servir de epitafio: «A estas alturas debería estar claro que el capítulo de la medición del tiempo en física cuántica solo podrá escribirse cuando dispongamos de datos sobre los tiempos de vuelo que sean genuinamente cuánticos». ¿Qué teoría señalarán los datos experimentales como la correcta? Como escribió Dürr, «es una pregunta apasionante».

Anil Ananthaswamy es periodista científico especializado en física y ciencias del espacio. Es autor de los libros *The edge of physics*, *The man who wasn't there* y *Through two doors at once: The elegant experiment that captures the enigma of our quantum reality.*



EN NUESTRO ARCHIVO

Teoría alternativa de Bohm a la mecánica cuántica. David Z. Albert en *IyC*, julio de 1994.

LOS ESTUDIOS SOBRE LA CIENCIA Y EL ASESORAMIENTO POLÍTICO

José Luis Luján | El conocimiento científico es una de las principales herramientas para el diseño y evaluación de las políticas públicas. Los estudios sobre la ciencia pueden mejorar esta función actual del conocimiento científico

Son muchas esas cosas llamadas «ciencia». A su vez, estas pueden ser analizadas desde distintas perspectivas, las cuales, en su conjunto, forman los estudios sobre la ciencia. Ciencia es la teoría general de la relatividad y también la economía experimental; para muchas personas la palabra «ciencia» abarca también los hornos microondas o los teléfonos móviles, porque la ciencia y la tecnología aparecen indisolublemente unidas en nuestro tiempo. Y en la sociedad actual, todo lo que es ciencia y tecnología es objeto de políticas públicas de promoción y de regulación.

Lo que llamamos ciencia ha cambiado con el tiempo, y, consecuentemente, también el modo en el que la sociedad lo recibe. Las dos guerras mundiales mostraron las posibilidades de la investigación científica para la producción de armas. Y fue tras la Segunda Guerra Mundial cuando se consolidaron las políticas públicas de promoción de la investigación científica. Se consideró que el conocimiento científico era fundamental para el desarrollo económico y el progreso social de los países. El famoso informe de Vannevar Bush (1945) era claro respecto a la necesidad de que los poderes públicos se ocuparan de financiar la investigación básica. Es lo que se llamó «el contrato social para la ciencia». Además, las distintas aplicaciones tecnológicas derivadas de la ciencia entraron en la vida cotidiana de manera masiva durante este período. La ciencia difícilmente podría ya considerarse solo una actividad puramente cognoscitiva practicada por élites ociosas. Se había convertido en un factor de competitividad económica, de lucha geoestratégica, de acción política y, por último, en un motor de cambio social.

Como decíamos, la ciencia puede ser estudiada desde diferentes disciplinas. La psicología, la politología, la economía, la comunicación, la antropología y la retórica constituyen algunos ejemplos de la diversidad académica en el actual análisis de la ciencia. No obstante, las disciplinas

que tradicionalmente se han ocupado de estudiar la ciencia han sido la historia, la filosofía y la sociología. Durante décadas, estas tres áreas mantuvieron entre sí una escasa relación. Pero ello ha cambiado a lo largo de los últimos decenios.

En los años setenta del siglo pasado, aparecieron propuestas que promovían la investigación de los variados aspectos de la ciencia, integrando distintas herramientas metodológicas y rompiendo con las fronteras disciplinares. Estas propuestas las podemos aglutinar en dos bloques: los programas sobre ciencia, tecnología y sociedad (CTS, o STS en inglés) y los programas sobre ciencia, tecnología y políticas públicas (CTPP, o STPP en inglés). Los estudios CTS se centraban en el análisis de la influencia de la ciencia y la tecnología sobre la vida de los ciudadanos. Los CTPP, por su parte, se ocupaban de estudiar modos de intervención pública en el desarrollo de la ciencia y la tecnología. Ambos enfoques poseían un interés transformador: los CTPP pretendían formular políticas científicas que condujeran al progreso social y los CTS buscaban democratizar los procesos de toma de decisiones relacionados con la ciencia y la tecnología. Los programas CTS aparecieron vinculados a movimientos sociales preocupados por los efectos y las consecuencias de la investigación científica y del desarrollo tecnológico, mientras que los CTPP poseían un componente más institucional, relacionado con las políticas públicas de promoción de la ciencia y la tecnología.

Por esa misma época, a partir de una interpretación radical de la obra de Thomas Kuhn, surgió también un enfoque alejado del objetivo transformador. Nos referimos a la «sociología del conocimiento científico». Su objetivo era estudiar los factores sociales que influían en la producción de conocimiento científico. Hasta ese momento, la filosofía de la ciencia se ocupaba de un análisis exclusivamente epistemológico de las teorías científicas, mientras que la sociología de la ciencia investigaba las normas de funcionamiento de las comunidades científicas. En este contexto, la sociología del conocimiento científico planteaba el análisis de las ideas científicas como producto de procesos sociales, rompiendo así la distinción entre aspectos epistémicos y sociales, y cuestionando la división del trabajo establecida entre historiadores, filósofos y sociólogos.

Como hemos dicho, a diferencia de los programas CTS y CTPP, la sociología del conocimiento científico no surgió con ningún propósito transformador. Precisamente para diferenciarse de la orientación CTS, el nuevo enfoque se denominó «estudios sobre ciencia y tecnología» (ECT, o S&TS en inglés).

En resumen, en los estudios sobre ciencia de los años setenta aparecieron tres enfoques, con objetivos y metodologías distintas, con diversos orígenes y que se desarrollaron también en culturas académicas diferentes. Sin embargo, en la última década del siglo xx se produje-



AGENCIA SINC / CINTA ARRIBAS

ron intentos de convergencia entre los tres, y en este proceso se involucraron también otras disciplinas tradicionales, como la filosofía de la ciencia. Veamos cómo evolucionaron a partir de ahí los estudios sobre ciencia.

La ciencia para la política como punto de encuentro

En 1991, Langdon Winner, representante del enfoque CTS, realizó una crítica al movimiento ECT (especialmente al constructivismo social). Para Winner, se trataba de un enfoque naíf, puesto que se limitaba a explicar el proceso de constitución de las tecnologías, sin abordar los problemas sociales relacionados con dichas tecnologías.

Hay tecnologías que son inherentemente políticas, y deben ser analizadas desde esta perspectiva

Veamos unos ejemplos clásicos. Trevor J. Pinch y Wiebe Bijker estudiaron el proceso que condujo al actual diseño de la bicicleta, mostrando que en su momento distintos actores sociales defendieron diferentes diseños y cómo finalmente se impuso la versión actual. Las trayectorias tecnológicas son contingentes y sus efectos dependen de las interpretaciones de los distintos actores sociales. Winner, por su parte, mostró que el diseño de los cerca de doscientos pasos elevados de Long Island obedece a deliberados criterios racistas y clasistas: se impedía que pudieran entrar los autobuses. De forma más radical, Winner defendió que para que ciertas tecnologías pudieran funcionar de manera correcta era necesario imponer una determinada organización de la sociedad: las centrales nucleares y todo lo relacionado con los ciclos del combustible obligan a adoptar medidas de seguridad incompatibles con la descentralización del poder, la autogestión y la democracia. Esto es, hay tecnologías que son inherentemente políticas, y deben ser analizadas desde esta perspectiva.

La crítica de Winner no fue desatendida. En 2001, Bijker (presidente entonces de la Sociedad para los Estudios Sociales de la Ciencia) defendió la necesidad de una mayor implicación pública de los investigadores ECT. Además de la labor puramente académica, Bijker señalaba otros ámbitos de trabajo, como el de las políticas públicas (asunto tratado hasta entonces por el enfoque CTPP), y la democratización de las decisiones sobre ciencia y tecnología (objetivo tradicional de los estudios CTS). La intención de Bijker era muy clara: derribar las fronteras entre los distintos enfoques en el estudio de la ciencia y la tecnología, así como reivindicar la relevancia social y política del estudio de la ciencia y la tecnología.

Por su parte, los sociólogos Harry Collins y Robert Evans publicaron en 2002 un artículo en el que sostenían que los estudios ECT habían de abordar un nuevo problema, a saber: hasta qué punto se puede extender la participación pública en ciencia y tecnología (un tema clásico en CTS). El objetivo ahora consistía en elaborar una teoría normativa de la experticia, cuando la normatividad había sido siempre algo ausente en los trabajos ECT.

También la filosofía de la ciencia se sumó a esa confluencia al ocuparse de la relación entre conocimiento científico y decisiones públicas. Así, a principios de los años noventa, el filósofo de la ciencia Philip Kitcher escribió sobre política científica y sobre la organización de las comunidades científicas. Propuso un modelo ideal de «ciencia bien ordenada» para promocionar ciertos bienes colectivos, aplicable, por ejemplo, a la ingeniería genética humana.

Conocimiento científico y decisiones públicas

Ya en nuestros días, en 2020, el discurso de Winner al recibir el premio John D. Bernal de la Sociedad para los Estudios Sociales de la Ciencia se centró en la Agencia Estadounidense de Evaluación de Tecnologías (Office of Technology Assessment). La presentó como un proyecto para analizar las consecuencias sociales del cambio tecnológico y asesorar al congreso estadounidense. Winner defendió que la evaluación de tecnologías fuera más participativa y democrática. Pero se han realizado otras múltiples propuestas en este sentido, con sus correspondientes metodologías. Por ejemplo, la denominada evaluación participativa

de tecnologías propone una metodología en la que la definición de un cierto problema resulta clave para el proceso evaluador. Es sabido que la definición de un problema determina, por lo menos en parte, su posible solución. Pero diferentes actores sociales definen el problema de maneras distintas, de modo que lo que para algunos es una solución, para otros no lo es, o incluso les genera un nuevo problema.

Desde la orientación ECT, Sheila Jasanoff, de la Escuela Harvard Kennedy, también se ha centrado recientemente en las llamadas epistemologías cívicas, es decir, en temas como la coproducción de la experticia, las agencias reguladoras y las instituciones políticas. Ha estudiado las diferencias de cultura política que afectan a los modos en los que se regula la tecnología, y ha definido las funciones de los expertos y de la participación pública a través de distintos estudios de casos. Estas investigaciones suelen esgrimirse como argumento crítico respecto de la tesis según la cual es posible una gestión neutral, basada en un conocimiento científico objetivo proporcionado por los expertos. No obstante, los análisis de Jasanoff no suelen ofrecer una guía para una gestión alternativa, salvo por lo que hace a su propuesta de crear una institución para deliberar sobre la edición genética.

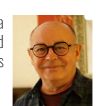
Desde la filosofía de la ciencia se están llevando a cabo análisis de la investigación científica como fuente de asesoría para la toma de decisiones tecnológicas, lo que Jasanoff había llamado «ciencia reguladora». Kristin Shrader-Frechette, Deborah Mayo, Carl Cranor y Heather Douglas, entre otros, han examinado las decisiones metodológicas en la evaluación de riesgos. Estos análisis muestran que en este tipo de ciencia los investigadores han de realizar elecciones que no están determinadas exclusivamente por factores epistémicos, sino también por consideraciones procedentes de las comunidades científicas, las agencias reguladoras, el ambiente social, etcétera.

Y otros autores, como Susan Haack y Nancy Cartwright, han examinado el concepto de prueba y las jerarquías evidenciales que se utilizan en distintos ámbitos de toma de decisiones, como el de la elaboración de políticas públicas o el de la justicia. Cartwright ha centrado buena parte de su trabajo reciente en el análisis crítico de los conceptos de causalidad y de prueba usados en las llamadas políticas públicas basadas en pruebas.

Conclusión

Desde finales del siglo pasado, se constata una confluencia parcial entre los distintos enfoques en los estudios sobre la ciencia y la tecnología. Un objeto de análisis compartido es la relación entre conocimiento científico y decisiones públicas. Las sociedades actuales recurren a la ciencia para asesorar la toma de decisiones políticas. Esta nueva función del conocimiento científico plantea diversos problemas académica y socialmente relevantes: definición de conocimiento experto, interacción entre aspectos cognitivos y sociales en la toma de decisiones, participación pública en políticas con un componente técnico y gestión de la incertidumbre, entre otros. Analizar estas cuestiones constituye uno de los modos en los que el estudio académico de la ciencia y la tecnología contribuye a la comprensión de las formas en las que las sociedades actuales enfrentan importantes problemas.

José Luis Luján, es catedrático de lógica y filosofía de la ciencia en la Universidad de las Islas Baleares



PARA SABER MÁS

Ciencia, tecnología y sociedad: Una introducción al estudio social de la ciencia y la tecnología. Marta Isabel González García, José A. López Cerezo y José Luis Luján López. Tecnos. 2000.

Designs on nature: Science and democracy in Europe and the United States. Sheila Jasanoff. Princeton University Press. 2005.

Evidence-based policy: A practical guide to doing it better. Nancy Cartwright y Jeremy Hardie. Oxford University Press. 2012.

Ciencia, tecnología y sociedad. Dirigido por Eduard Aibar y Miguel Ángel Quintanilla. Trotta. 2012.

Experts and the will of the people: Society, populism and science. Harry Collins, Robert Evans, Darrin Durant y Martin Weinel. Palgrave, 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

La cultura científica. Emilio Muñoz en *IyC*, junio de 2014.

Sin ciencia no hay innovación. Antonio Pich en *IyC*, noviembre de 2019.

La ciencia a disposición de la política. Andreu M. Climent en *IyC*, enero de 2019.

AFIRMACIONES DUDOSAS SOBRE LA SALUD

Naomi Oreskes | Algunas creencias populares, como que la fertilidad de la mujer cae a los 30 años, tienen una base científica endeble

¿Por qué los fabricantes de dispositivos de fitnes sostienen que hay que dar 10.000 pasos a diario? ¿De verdad es necesario beber ocho vasos de agua al día? La base científica de las creencias populares sobre la salud suele ser endeble. Un artículo del *New York Times*, por ejemplo, señala que la idea de los 10.000 pasos procede más de la mercadotecnia (*10,000 Steps* era el nombre de uno de los primeros podómetros) que de la ciencia. Los datos indican claros beneficios del ejercicio moderado, quizás 7000 pasos más o menos, pero no necesariamente más.

Por lo común, la sabiduría popular es solo una verdad a medias. La insistencia en todos esos pasos es un ejemplo. Y otro, los vasos de agua. Si uno espera a tener demasiada sed, le puede asaltar la tentación de tomar refrescos o bebidas azucaradas con cafeína, lo que no es bueno. Pero una revisión científica de 2002 no halló «estudios científicos» que aconsejaran a los adultos sanos beber ocho vasos en un clima templado. Si bien no supone que sea malo, sí indica que tal vez no deberíamos preocuparnos si bebemos solo seis.

Vale la pena profundizar un poco en los dichos sobre la salud que circulan a menudo antes de aceptarlos al pie de la letra. A veces subyace un fondo de verdad enormemente exagerado o se descubre que un consejo procede de datos obsoletos o mal aplicados. Esto último es lo que sucedió con una famosa afirmación engañosa sobre la fertilidad femenina.

Desde hace décadas, las mujeres reciben advertencias angustiosas sobre su «reloj biológico». Nos han repetido una y otra vez que la fertilidad cae drásticamente a partir de los 30 años, por lo que, si una quiere tener hijos, debe ponerse a ello o congelar óvulos. La congelación de embriones es hoy día un gran negocio, y constituye un tema de conversación corriente entre las jóvenes profesionales. Las personas transgénero y no binarias también buscan embarazos, con la consiguiente ansiedad al cumplir años.

Pero, como ha señalado Jean M. Twenge, psicóloga de la Universidad Estatal de San Diego, en California, tal afirmación se basa en datos muy escasos, buena parte de ellos de dudosa calidad o pertinencia. La idea proviene, en gran medida, de un artículo de 2004 basado en registros fechados entre 1670 y 1830. Muchas cosas han cambiado desde entonces, como la atención médica y la nutrición. En las naciones más ricas, las personas son ahora más sanas en general y es probable que sean más fértiles durante un mayor periodo de la vida. Los datos recogidos sistemáticamente por el Centro Nacional de Estadística Sanitaria estadounidense demuestran que, entre 1980 y 2002, las tasas de fertilidad de las mujeres mayores de 30 años habían aumentado. También conviene destacar que, cuando empezaron a extenderse los tratamientos de infertilidad y se abrieron más clínicas



ILUSTRACIÓN DE JAY BENDT

en los años ochenta y noventa del pasado siglo, esta creciente industria hizo sonar las alarmas sobre el reloj biológico, con un interés propio en el asunto.

Pese a lo importante que es tener hijos para tantas personas, y aunque los tratamientos de infertilidad son caros, obtienen discretas tasas de éxito y no están exentos de riesgos, la triste realidad es que escasean los estudios sólidos sobre la infertilidad según la edad. Los datos de que disponemos tienden a mostrar que, aunque la fertilidad disminuye ligeramente a edades más avanzadas, la mayoría de las mujeres siguen siendo fértiles bien entrada la treintena, que para muchas personas es un buen momento para tener hijos. Siempre ha existido una inclinación cultural a culpar a las mujeres de la infertilidad, pero cuando una pareja es infértil, es igualmente probable que la causa radique en el varón. La fertilidad masculina también disminuye con la edad, pero ¿dónde están las advertencias sobre el reloj biológico de los varones?

Al igual que el reloj femenino o los 10.000 pasos, muchas creencias sobre la salud tienen raíces superficiales y endebles. Sin embargo, en ocasiones, la sabiduría popular está respaldada por los hechos: la mayoría de nosotros necesitamos alrededor de ocho horas de sueño por noche, por ejemplo. Entonces, ¿cómo puede uno valorar lo que escucha o lee?

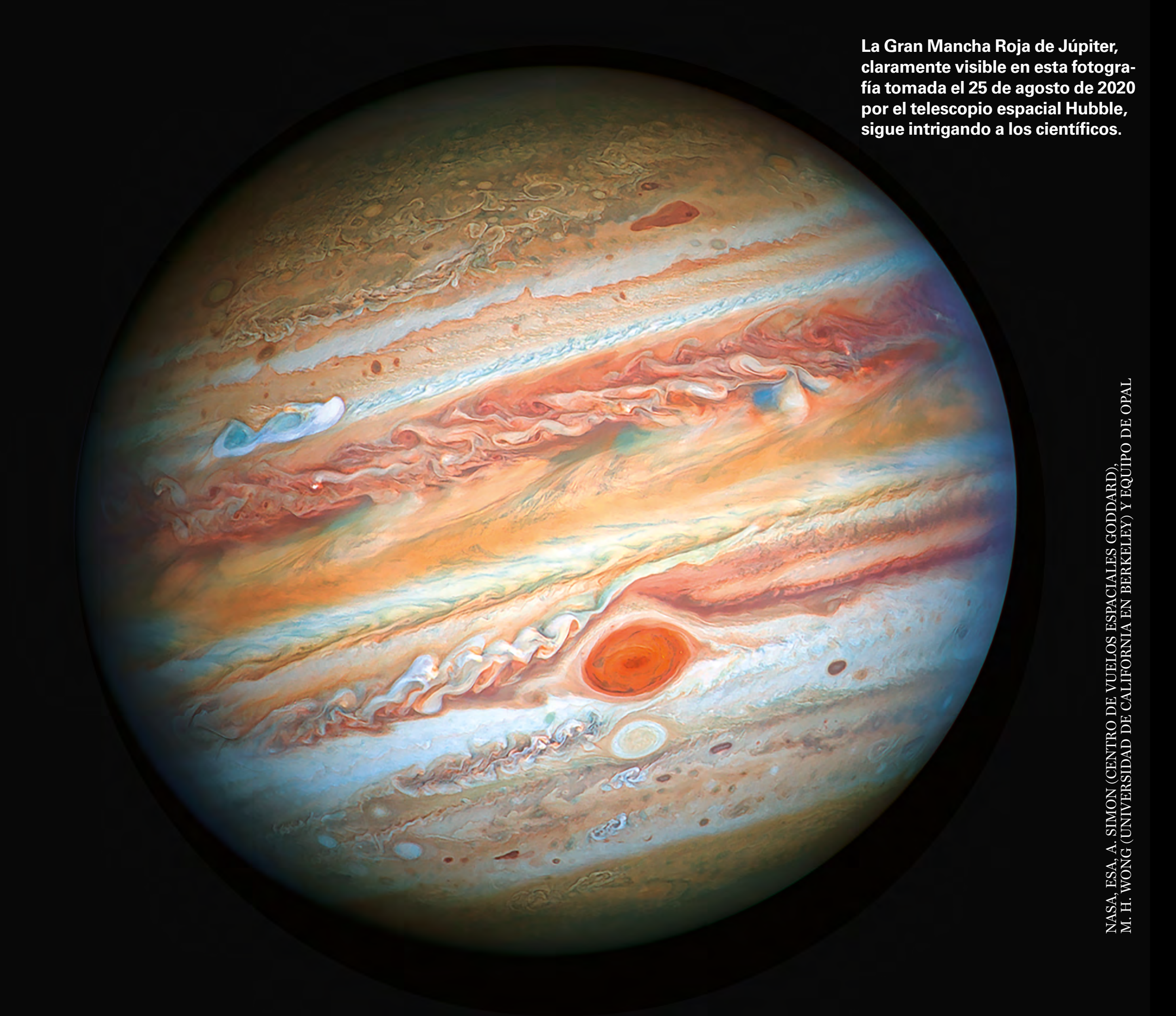
Por un lado, hay que ser escéptico ante cualquier afirmación rotunda basada en un solo estudio. La ciencia fiable exige construir una argumentación polifacética y detallada, lo que lleva tiempo y casi nunca se logra en una sola investigación. La biblioteca médica en línea PubMed.gov permite a cualquiera averiguar si un tema está bien estudiado o no. Y los Institutos Nacionales de Salud de Estados Unidos han elaborado un programa de consenso médico con más de 160 declaraciones publicadas sobre diversas enfermedades y sus tratamientos. Algunas de ellas son francamente comprensibles y ninguna se basa solo en datos de hace más de un siglo. [*Nota de los editores: En este sentido, cabe destacar también la labor de la Colaboración Cochrane, una organización sin ánimo de lucro que cada año realiza numerosas revisiones sistemáticas de estudios científicos del ámbito sanitario con el propósito de promover la toma de decisiones bien informadas. Entre los muchos proyectos divulgativos derivados de su trabajo, resulta especialmente útil para los ciudadanos Nutrimedia, una web sobre alimentación y nutrición que ofrece análisis rigurosos del grado de confianza que merecen algunos mensajes que se difunden en los medios de comunicación y las redes sociales.*]

Naomi Oreskes, es profesora de historia de la ciencia en la Universidad Harvard. Ha publicado *¿Por qué confiar en la ciencia?* (Princeton University Press, 2019) y es coautora de *Expertos exigentes* (Universidad de Chicago, 2019).



LA GRAN MANCHA ROJA DE JÚPITER EN EL LABORATORIO

Daphné Lemasquerier, Benjamin Favier y Michael Le Bars | Recientes experimentos y simulaciones indican que la descomunal tormenta del planeta gigante es un «vórtice flotante» como los que se han observado en las profundidades de los océanos terrestres



La Gran Mancha Roja de Júpiter, claramente visible en esta fotografía tomada el 25 de agosto de 2020 por el telescopio espacial Hubble, sigue intrigando a los científicos.

NASA, ESA, A. SIMON (CENTRO DE VUELOS ESPACIALES GODDARD), M. H. WONG (UNIVERSIDAD DE CALIFORNIA EN BERKELEY) Y EQUIPO DE OPAL

Con unos vientos que pueden superar los 300 kilómetros por hora y una vida media de unos diez días, los ciclones son uno de los fenómenos más impresionantes de la atmósfera terrestre. Sin embargo, no pueden compararse con los vórtices observados en Júpiter. El más famoso de ellos, la Gran Mancha Roja, se desató hace al menos trescientos cincuenta años.

Gracias a los avances en las técnicas de observación de la época, Robert Hooke, en 1665, y Jean-Dominique Cassini, al año siguiente, fueron los primeros en mencionar la presencia de un enorme remolino en el hemisferio sur del planeta gigante. A partir del siglo xx, las observaciones se multiplicaron gracias a los instrumentos terrestres, el telescopio espacial Hubble y las sondas espaciales (Pioneer 10 y 11, en 1973 y 1974; Voyager 1 y 2, en 1979; Galileo, de 1995 a 2003; y Juno, desde 2016). Los datos han revelado las espectaculares características de la Gran Mancha Roja: su contorno elíptico, que en 2015 medía 15.000 kilómetros de largo por 12.000 de ancho, podría contener al menos una Tierra entera. Y en su interior los vientos soplan a casi 680 kilómetros por hora.

Pero, hasta la fecha, ningún modelo ha explicado de forma satisfactoria cómo puede formarse una tormenta gigante así y persistir durante tanto tiempo en un entorno muy turbulento.

La atmósfera joviana, compuesta principalmente de hidrógeno y helio, presenta varias capas de nubes de amoníaco (NH_3), sulfuro de hidrógeno (H_2S) e hidrosulfuro de amonio (NH_4SH). Los cristales de hielo y ciertas moléculas cromóforas, presumiblemente relacionadas con el azufre y el fósforo, tiñen las nubes de distintos colores en función de factores locales como la temperatura.

Ese contraste de tonos refleja de manera admirable la dinámica de Júpiter. El planeta presenta una decena de bandas estables y paralelas al ecuador, asociadas a los intensos vientos de 300 kilómetros por hora que cizallan la atmósfera de este a oeste, o a la inversa. Cientos de vórtices, o remolinos, circulan en el interior de esas bandas y en ocasiones se fusionan. Los vórtices se denominan ciclones cuando giran en el mismo sentido que el planeta (antihorario en el hemisferio norte y horario en el sur) y anticiclones en caso contrario. Cerca del 90 por ciento de los vórtices son anticiclones con una morfología ovalada bastante regular. Los ciclones, menos numerosos, suelen presentar contornos erráticos, alargados y filamentosos.

En síntesis

La Gran Mancha Roja de Júpiter es un anticiclón de un tamaño y una longevidad excepcionales, cuya estructura y dinámica aún no se conocen de forma precisa.

Los experimentos de laboratorio y las simulaciones respaldan la idea de que se trata de un vórtice flotante, como los que se forman en las profundidades de los océanos terrestres.

En los próximos años, los datos de la sonda Juno arrojarán luz sobre la estructura tridimensional del asombroso fenómeno atmosférico y permitirán poner a prueba esa teoría.

En un ambiente tan extremo y caótico, es difícil explicar la persistencia de la Gran Mancha Roja, cuyas observaciones se han limitado sobre todo a la capa de nubes de la atmósfera. Sin embargo, su estructura profunda podría darnos pistas sobre su longevidad. Una hipótesis interesante es que el vórtice no se halla anclado profundamente al interior del planeta, sino que se trata más bien de una estructura superficial que «flota» en la atmósfera.

Explorar Júpiter a fondo

La sonda Juno, que está en órbita alrededor de Júpiter, debería proporcionarnos información crucial para resolver el enigma. Sus instrumentos examinan de forma indirecta el interior joviano hasta profundidades de cientos o incluso miles de kilómetros bajo las nubes. Aun así, esa cifra es modesta si la comparamos con el radio ecuatorial del planeta, que es de unos 70.000 kilómetros. Los datos de Juno nos ayudarán a estudiar la parte oculta de la Gran Mancha Roja y a comprobar si se trata de un vórtice flotante. No obstante, la interpretación de las nuevas observaciones es delicada, puesto que se basa en modelos que conllevan hipótesis aún debatidas.

A fin de reforzar la teoría del vórtice flotante, nuestro equipo ha explorado estrategias complementarias a las observaciones que realiza Juno sobre el terreno. Hemos diseñado un dispositivo experimental y llevado a cabo simulaciones informáticas con configuraciones simplificadas, que recrean a escala de laboratorio algunas de las condiciones del planeta gigante.

La misión Juno

La sonda espacial Juno de la NASA despegó en 2011 y orbita en torno a Júpiter desde 2016. A fin de evitar al máximo el intenso cinturón de radiación del planeta, Juno adoptó una trayectoria elíptica muy alargada, con un período de 53,5 días: primero se aproximaba al polo norte joviano hasta situarse a tan solo 3500 kilómetros de las nubes y luego, tras alcanzar el polo sur, se volvía a alejar a 8,1 millones de kilómetros. (El período orbital se redujo a 43 días después de que Juno sobrevolara la luna Ganímedes en junio de 2021.) Cada uno de los 76 sobrevuelos previstos hasta 2025 abre la puerta a nuevos hallazgos científicos, gracias a los nueve instrumentos alimentados por paneles solares que lleva a bordo la nave.



NASA/JACK PFALLER

La cámara JunoCam proporciona imágenes en luz visible de las nubes y de su dinámica, con una extraordinaria resolución de 1 píxel por cada 15 kilómetros. Además, varios sensores electromagnéticos y dos detectores de partículas caracterizan la atmósfera, mientras que un magnetómetro mide el campo magnético joviano, todavía poco conocido. Finalmente, un radiómetro de microondas y un gravímetro de ondas de radio sondean el interior de Júpiter por debajo de la capa de nubes, hasta profundidades de cientos y miles de kilómetros, respectivamente. El análisis de sus datos revela la dinámica interna joviana, hasta ahora inaccesible.

Entre los primeros hallazgos de Juno destacan la huella térmica que deja la Gran Mancha Roja hasta una profundidad de al menos 300 kilómetros, la penetración de las bandas jovianas hasta una profundidad de 3000 kilómetros e incluso la probable ausencia de un núcleo rocoso y metálico en el centro del planeta, algo que iría en contra de los modelos comúnmente aceptados. La utilización de esos datos únicos sobre la estructura interna del planeta requiere una estrecha colaboración entre investigadores teóricos, expertos en simulaciones informáticas y experimentadores.

Los resultados son alentadores: hemos logrado mostrar que los vórtices flotantes son muy estables y reproducir algunas características de la Gran Mancha Roja, como su forma elíptica.

Para generar un vórtice así en los experimentos de laboratorio y en las simulaciones, son indispensables una serie de ingredientes. En líneas generales, un vórtice es una bolsa de fluido que gira sobre sí misma con respecto a un eje bien definido y que presenta en su interior trayectorias cerradas, ya sean circulares o elípticas. En consecuencia, el sistema intercambia poco o ningún fluido con su entorno.

A todos nos resultan familiares ese tipo de estructuras, que podemos observar al vaciar un fregadero, en las estelas de los aviones o en los ríos, aguas abajo de los puentes. Pero a nosotros nos interesan vórtices mucho mayores, en los que el fluido está sometido a un efecto adicional: la rotación del planeta (la Tierra o Júpiter). Esos vórtices a gran escala se observan en el océano y la atmósfera, y los vemos a diario en los mapas meteorológicos.

Los vórtices surgen a partir de variaciones de presión en el seno del fluido, las cuales generan flujos desde las zonas de altas presiones hacia las de bajas presiones. Esos flujos son desviados por la rotación del planeta (o, siendo más precisos, por la fuerza de Coriolis), de modo que el fluido que converge hacia una región de bajas presiones comienza a girar en torno ella y forma un ciclón. De igual modo, el fluido que diverge desde una zona de altas presiones forma un anticiclón.

En los años sesenta, el británico Raymond Hide se basó en los ciclones de la atmósfera terrestre para desarrollar los primeros modelos que trataban de explicar el origen de la Gran Mancha Roja de Júpiter. Partió de un flujo puramente bidimensional, suponiendo que la atmósfera tenía un espesor insignificante y descansaba sobre una superficie sólida (o al menos mucho más viscosa), como la de los continentes o los océanos terrestres. Así, la Gran Mancha Roja se hallaría anclada a algún relieve de esa superficie. Su hipótesis se produjo en una

época en que el conocimiento sobre la composición y la estructura del gigante gaseoso era muy limitado. Y, de hecho, la realidad de Júpiter es muy distinta.

Bajo las nubes jovianas no hay ninguna superficie sólida, sino una mezcla de gases que se va licuando poco a poco a medida que aumenta la profundidad. En la Tierra, los ciclones y anticiclones interactúan de forma considerable con los océanos y los continentes. En cambio, en Júpiter, los vórtices son libres: flotan en la atmósfera y no están ligados a ningún accidente topográfico. Esa es precisamente una de las ideas que se han propuesto para explicar su longevidad: la ausencia de fricción con una superficie sólida hace que apenas haya procesos que disipen energía en la atmósfera del planeta. La persistencia de los vórtices también se ve favorecida por la rápida rotación de Júpiter (un día joviano dura 9 horas y 55 minutos) y la existencia de intensos vientos zonales.

En 1988, Joël Sommeria, por entonces en la Universidad de Texas en Austin, y sus colaboradores llevaron a cabo un experimento de laboratorio con un diseño «cuasibidimensional». La idea es que el planeta gira tan rápido que la fuerza de Coriolis impide cualquier movimiento vertical: el fluido se desplaza en bloque formando columnas. Por lo tanto, en tales estudios es posible ignorar la dimensión vertical aunque el sistema sea tridimensional. Entretanto, Philip Marcus, de la Universidad de California en Berkeley, realizaba simulaciones por ordenador con ese mismo diseño. Ambos observaron un fenómeno similar: una serie de pequeños remolinos que se fusionaban y alimentaban uno más grande (algo que, en efecto, parece suceder en Júpiter).

No obstante, la estructura en columnas no deja de ser una simplificación. Si los vórtices de Júpiter son realmente libres y flotan en la atmósfera, tendrán una extensión vertical limitada. Así pues, debemos estudiar el sistema tridimensional para acabar de comprender su estructura y estimar su espesor, que no puede observarse de forma directa.

El papel de la estratificación

En 2012, Marcus y sus colaboradores, entre ellos uno de nosotros (Le Bars), propusieron que la estratificación de la atmósfera joviana constituía un factor determinante. Esa estratificación refleja el hecho de que la densidad del fluido no es homogénea: como resultado de las variaciones de temperatura y presión en la troposfera, la densidad aumenta con la profundidad. La morfología de los vórtices responde a un equilibrio entre dos efectos: la rotación del planeta previene la expansión radial de los remolinos, mientras que la estratificación del medio en el que flotan la favorece.

En la Gran Mancha Roja, los vientos soplan a casi 680 kilómetros por hora

Así, el vórtice adopta una forma lenticular más o menos aplanada en función de la intensidad relativa de las fuerzas asociadas a la rotación y la estratificación. Si la rotación es constante, cuanto más estratificado se encuentre el medio (es decir, cuanto más deprisa cambie la densidad), más aplanado será el remolino. Este no descansa sobre ninguna superficie sólida, pero su extensión vertical es limitada: se trata de un vórtice flotante.

Sin embargo, esas sencillas consideraciones sobre el origen y el equilibrio de los vórtices flotantes no bastan para determinar si la Gran Mancha Roja es realmente una de esas estructuras. Y es que los vórtices jovianos forman parte de una dinámica global muy rica, donde coexisten e interactúan numerosos fenómenos (como vientos zonales, turbulencia, efectos de compresibilidad vinculados a los gases o efectos térmicos). Así pues, resulta esencial estudiar los vórtices en un modelo completo de circulación planetaria, pero en ese tipo de simulaciones es difícil desentrañar y analizar la influencia de cada parámetro.

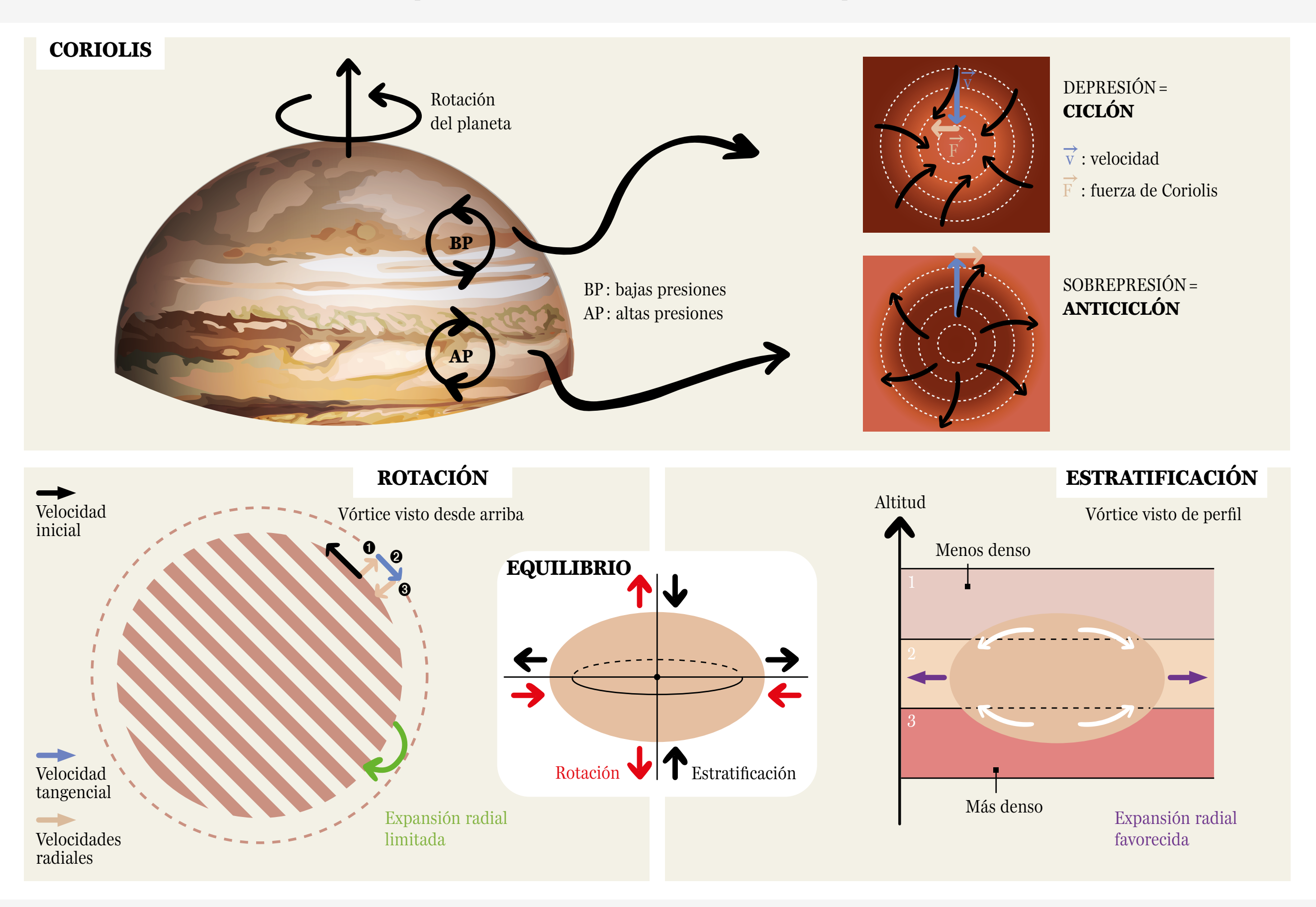
Una posible estrategia consiste en aislar cada factor físico en un modelo simplificado, para comprender sus repercusiones sobre las propiedades de los remolinos. Por ejemplo, en 2019, nos centramos en la acción de los chorros zonales que bordean la Gran Mancha Roja al norte y al sur, los cuales ejercen fuerzas de cizalladura que confieren al vórtice una forma elipsoidal en vez de circular.

Ingredientes de un vórtice flotante

La atmósfera de Júpiter es un sistema difícil de modelizar, ya que concurren muchos efectos, como la turbulencia, los intercambios térmicos o la compresibilidad. No obstante, es posible aislar los principales factores que intervienen en la formación de un vórtice flotante: la fuerza de Coriolis, la rotación del remolino y la estratificación de la atmósfera.

1. Fuerza de Coriolis

Para un planeta que gira en sentido antihorario alrededor de su eje, la fuerza de Coriolis generada por la rotación desvía hacia la derecha (en el hemisferio norte) o la izquierda (en el sur) cualquier movimiento horizontal de grandes masas de fluido. De este modo, en las zonas de bajas presiones se forman ciclones, y en las de altas presiones, anticiclones.



2. Rotación del vórtice

Si un remolino comienza a expandirse horizontalmente, su radio aumenta con cierta velocidad radial (❶). La fuerza de Coriolis desvía hacia la derecha las partículas del fluido que se alejan del centro, lo que genera una velocidad tangencial (❷). Entonces, la fuerza de Coriolis (que actúa en todo momento) tiende a hacer que el vórtice recupere su radio inicial (❸). Eso limita la expansión del vórtice.

3. Estratificación

Los vórtices son bolsas de fluido de densidad homogénea inmersas en un medio estratificado. La parte superior del remolino, rodeada de un medio menos denso (*capa 1*), tiende a hundirse. En cambio, su base, situada en un medio de mayor densidad (*capa 3*), tiende a ascender. En conjunto, la estratificación actúa como una prensa que aplasta el vórtice en un plano horizontal, lo que favorece su expansión radial.

4. Equilibrio

Los efectos de la rotación y la estratificación son opuestos y se equilibran, de modo que el vórtice adopta una forma elipsoidal. Si la rotación es muy rápida y el medio está poco estratificado, el elipsoide se alarga verticalmente, mientras que si la rotación es lenta o la estratificación es muy acusada, el elipsoide se aplana y adquiere una morfología lenticular.

SHUTTERSTOCK/AZUZL, *POUR LA SCIENCE*

Un planeta en un acuario

Nuestro estudio es, ante todo, experimental: el objetivo es recrear la Gran Mancha Roja de Júpiter en un tanque con dimensiones del orden de un metro, lo que supone reducir la escala más de diez millones de veces. Para que el comportamiento dinámico siga siendo el mismo, hay que contrarrestar esa increíble disminución del tamaño del vórtice variando otros parámetros experimentales. En nuestro caso, el cambio de escala puede compensarse en parte mediante un aumento de la velocidad de rotación y una estratificación más acusada que la de Júpiter.

Para recrear la Gran Mancha Roja en el laboratorio, usamos un tanque de sección cuadrada de 50 centímetros de lado por 70 de alto. El tanque se llena de agua salada y se hace girar a gran velocidad (5 revoluciones por minuto) en torno a un eje vertical para simular la rotación del planeta.

¿Y la estratificación? Las capas gaseosas superficiales de la troposfera joviana pesan menos que las más internas, debido a la iluminación solar y al aumento de la presión con la profundidad. Nuestro experimento emplea agua en lugar de gas, lo cual presenta numerosas ventajas. Por ejemplo, para reproducir las variaciones de densidad y el efecto de la estratificación, basta con añadir más y más sal a medida que descendemos en el tanque, de modo que el agua sea más ligera en la superficie.

Aplicando la noción matemática de semejanza, podemos lograr que las intensidades relativas de las fuerzas que definen el equilibrio del vórtice sean las adecuadas. Así, en nuestro experimento, la relación entre la rotación y la estratificación es del mismo orden de magnitud que en Júpiter. Por último, para simular los chorros zonales, usamos una membrana flexible que rota alrededor de unos cilindros, como si fuera una cinta transportadora vertical sumergida en el tanque. Al arrastrar el fluido, la membrana genera una cizalladura similar a la de dos vientos que soplan en direcciones opuestas.

El vórtice se crea introduciendo un fluido (agua de salinidad intermedia, a veces teñida con un colorante fluorescente) en el centro del tanque, entre las dos partes de la membrana. El líquido se inyecta a través de un tubo delgado que no gira con el recipiente. Un observador sumergido en el tanque en movimiento (lo cual sería equiparable a estar en el planeta) vería que este líquido rota del mismo modo que el dispositivo, pero en sentido opuesto: constituye un remolino anticiclónico, como la mayoría de los vórtices jovianos.

Una vez generado el vórtice, es posible estudiar su evolución y su morfología. Para ello, se añaden pequeñas partículas reflectantes al fluido inyectado y se ilumina el tanque con láminas de luz láser. Eso permite medir el desplazamiento de las partículas y deducir la velocidad del fluido en función del tiempo, mediante una técnica conocida como «velocimetría por imágenes de partículas».

Nuestro objetivo es recrear la Gran Mancha Roja a una escala diez millones de veces menor

Al realizar el experimento, obtuvimos un vórtice lenticular de unos pocos centímetros, cuyos tres ejes presentaban longitudes distintas. Complementamos nuestro análisis con simulaciones por ordenador, consistentes en resolver las ecuaciones que gobiernan el movimiento del fluido usando la geometría definida por el dispositivo. Dichas simulaciones nos ayudaron a comprender mejor el experimento, al permitirnos conocer las velocidades y la densidad del fluido en todo el espacio (experimentalmente solo podemos medir las velocidades en un plano) y cuantificar la influencia de los bordes del tanque. Sin embargo, una vez que el dispositivo experimental está listo, es más rápido ponerlo en marcha que acometer cálculos numéricos.

Gracias al buen acuerdo entre el estudio experimental y el análisis numérico, pudimos describir la contribución de los distintos parámetros (rotación, estratificación y cizalladura) que intervienen en la generación de un vórtice estable de forma elipsoidal.

¿Qué información puede extraerse de esas investigaciones para comprender el caso particular de Júpiter? A pesar de la naturaleza extremadamente caótica de la atmósfera joviana, las fuerzas que determinan la morfología general de los vórtices presentan el mismo equilibrio (a primer orden de aproximación) en nuestro

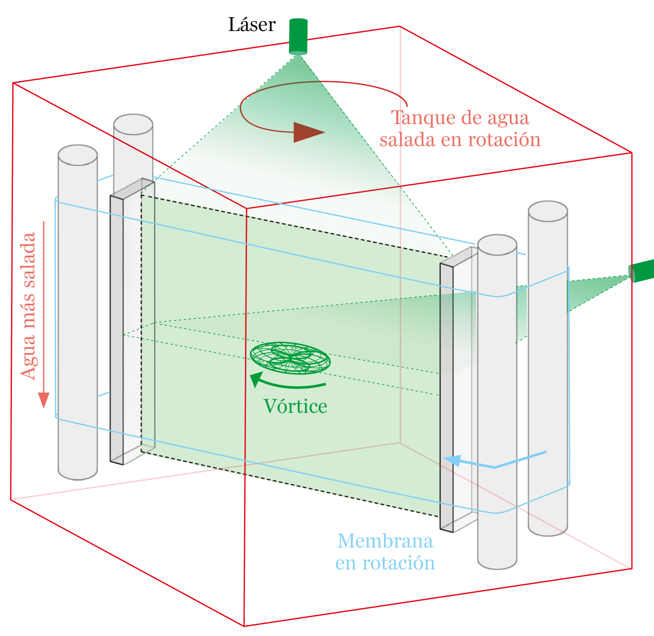
experimento y en Júpiter. Empleando parámetros evaluados por medio de datos observacionales de la superficie joviana (la velocidad de rotación de los vórtices y del planeta, la diferencia de densidad entre los remolinos y la atmósfera circundante, la velocidad de los vientos que cizallan los vórtices), nuestro modelo permite predecir la forma tridimensional de estos fenómenos naturales. En concreto, a partir del tamaño horizontal de los remolinos podemos estimar su profundidad, un dato que por el momento resulta inaccesible a las observaciones por culpa de la opacidad de la atmósfera joviana.

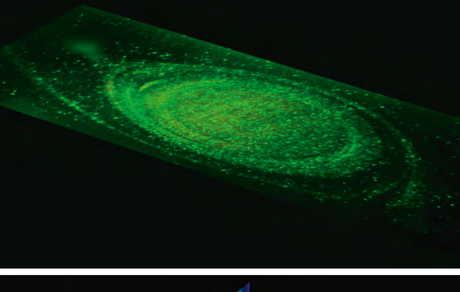
De este modo, si aplicamos nuestros resultados a los vórtices jovianos, podemos extraer varias conclusiones. En primer lugar, los remolinos de Júpiter presentan una forma muy aplanada y resultan ser muy poco profundos. En el caso de la Gran Mancha Roja, se obtiene un espesor de cientos de kilómetros ¡para un tamaño horizontal de más de diez mil kilómetros! Nuestro conocimiento sobre la dinámica de Júpiter comienza a precisarse: sus múltiples manchas ovaladas podrían corresponder a vórtices muy superficiales, atrapados entre chorros zonales que penetrarían varios miles de kilómetros en el interior del planeta. Ahora es crucial saber si las observaciones de Juno corroborarán esa geometría.

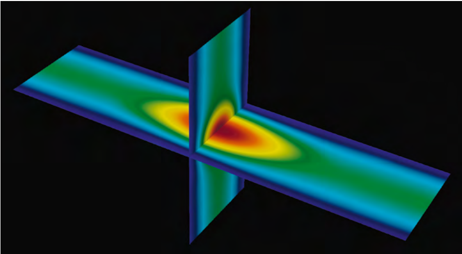
También es interesante considerar la evolución de la Gran Mancha Roja. Sabemos, por ejemplo, que su extensión horizontal se ha reducido gradualmente a lo largo de al menos cuarenta años (pasó de 22.000 kilómetros en 1996 a 15.000 en 2015), mientras que su velocidad de rotación ha aumentado. Nuestros trabajos muestran que, a pesar de esa evolución, los diversos factores implicados se habrían compensado de tal modo que el espesor del vórtice habría permanecido constante. Algunos expertos piensan que el enorme vórtice podría terminar desapareciendo, aunque también cabe la posibilidad de que se trate de una tendencia reversible.

Nuestro experimento todavía no puede reproducir esa lenta evolución. Al limitarnos a las fuerzas dominantes, obtenemos una situación de equilibrio en la que se forman vórtices flotantes estables. Es probable que los efectos disipativos, como la turbulencia o la radiación de calor al espacio, desempeñen un papel fundamental en la evolución del tamaño de la Gran Mancha Roja. Sin embargo, en nuestro tanque, esos fenómenos son difíciles de recrear, ya que la energía se disipa sobre todo a causa de otro factor: la viscosidad.

Nuestros resultados experimentales aportan indicios sobre lo que sucede en el planeta, pero debemos





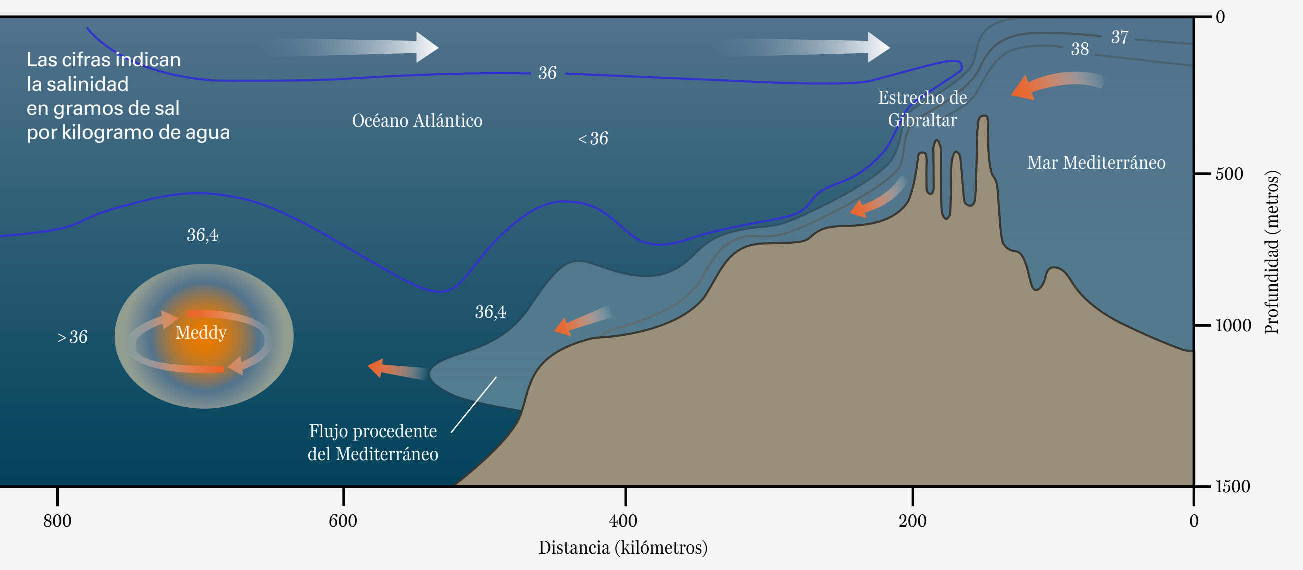


POUR LA SCIENCE Y D. LEMASQUERIER ET AL.

El equipo del Instituto de Investigación de Fenómenos Fuera de Equilibrio ha recreado los principales factores físicos que gobiernan la dinámica de los vórtices de Júpiter usando un tanque de agua en rotación. Una membrana (*líneas azules*) que gira alrededor de unos rodillos reproduce los esfuerzos de cizalladura que ejercen los chorros zonales. Creando un gradiente de salinidad en el agua se consigue una estratificación vertical. Los investigadores generaron en el centro del dispositivo un vórtice flotante (*imagen superior derecha*) que también han obtenido en una simulación informática (*imagen inferior derecha, los colores cálidos representan presiones más altas*).

Remolinos atlánticos

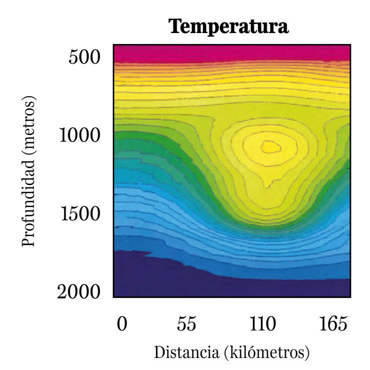
En los océanos terrestres también se forman vórtices flotantes, y los más conocidos son los *meddies*. El agua cálida y salada del Mediterráneo penetra en el océano Atlántico por el estrecho de Gibraltar y (al ser más densa) se hunde hasta los 1000 metros de profundidad. La fuerza de Coriolis asociada a la rotación terrestre puede hacer que en esa corriente se formen vórtices, que se desplazan horizontalmente hacia el oeste. Tales remolinos miden unos 600 metros de altura y casi 100 kilómetros de diámetro, de modo que poseen una forma lenticular muy aplanada.

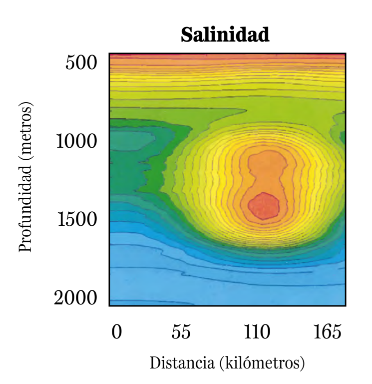


ser cautelosos a la hora de trasladar esos datos a la situación real. El siguiente paso de nuestro estudio consistirá en refinar nuestro modelo, incorporando nuevos parámetros físicos de forma controlada para dilucidar cómo actúa cada uno de ellos.

Por ejemplo, una diferencia importante entre líquidos y gases tiene que ver con la compresibilidad: reducir el volumen de un líquido es muy difícil, mientras que podemos comprimir un gas con nuestras propias manos, como cuando usamos una bomba de bicicleta. Los efectos de la compresibilidad son importantes para la dinámica de la atmósfera gaseosa de Júpiter y sería posible cuantificarlos. En el caso de la Gran Mancha Roja, deformarían el vórtice en la dirección vertical y producirían una asimetría con respecto al plano ecuatorial: la «raíz» del remolino sería menos profunda en las regiones subyacentes más densas y su «cabeza» se elevaría más en las zonas de menor densidad.

Asimismo, es esencial analizar las limitaciones de nuestro modelo y compararlo con las teorías existentes y con simulaciones más detalladas de la dinámica joviana. Estas tienen la ventaja de ser más completas, pero los superordenadores precisan meses (y a veces más





Los *meddies* pueden identificarse mediante sondeos verticales en la columna de agua, ya que forman bolsas de agua especialmente caliente (*arriba*) y salada (*abajo*).

FUENTE: «TRACKING OCEAN EDDIES», POR PHILIP L. RICHARDSON EN *AMERICAN SCIENTIST*, VOL. 81, PÁGS. 261-271, MAYO DE 1993; CHARLOTTE CALAMENT (*mapa*); FUENTE: «A CENSUS OF *MEDDIES* TRACKED BY FLOATS», POR PHILIP L. RICHARDSON ET AL. EN *PROGRESS IN OCEANOGRAPHY*, VOL. 45, PÁGS. 209-250, FEBRERO DE 2000 (*temp. y salinidad*)

Semejanza parcial

Las ecuaciones de Navier-Stokes describen el movimiento de fluidos con propiedades muy diversas: se aplican a fluidos con o sin viscosidad, y a líquidos como el agua o gases como el aire, cuya naturaleza es muy diferente. Por ejemplo, el aire es compresible —podemos comprimirlo para reducir su volumen y aumentar su densidad— y el agua apenas lo es. Estas ecuaciones pueden aplicarse incluso a algunos fluidos con comportamientos exóticos (fluidos «no newtonianos» como la sangre o el agua con maicena).

La universalidad de las ecuaciones de Navier-Stokes tiene implicaciones sorprendentes. En particular, son válidas tanto a la escala de una taza de café como a la de una tormenta en la atmósfera joviana. Eso permite recrear en el laboratorio determinados fenómenos físicos observados en fluidos naturales: podemos modificar su tamaño o la naturaleza del fluido sin que cambie la dinámica, siempre y cuando respetemos la intensidad relativa de las distintas fuerzas implicadas.

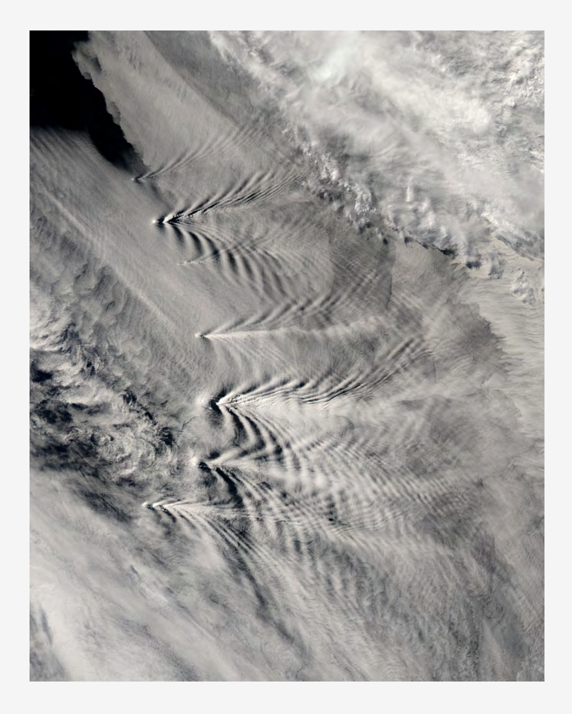
Tomemos como ejemplo la convección en el manto terrestre. Este movimiento, responsable de la tectónica de placas, actúa a lo largo de miles de kilómetros y con velocidades del orden de centímetros por año. Surge a partir de las diferencias de densidad entre la roca caliente de la base del manto y la más fría y densa de las regiones superiores. La dinámica convectiva está controlada por los efectos de la viscosidad y puede recrearse de forma simplificada en una maqueta de 15 centímetros de alto. Para ello, se calienta por debajo un líquido viscoso (una solución de celulosa, por ejemplo) a fin de establecer un contraste térmico del orden de unas pocas decenas de grados. Si respetamos la relación que se cree que existe en el manto entre las fuerzas de flotabilidad (la solución calentada tiende a ascender debido a su menor densidad) y las fuerzas viscosas que se oponen a ese ascenso, logramos reproducir un fenómeno a gran escala en una maqueta de tamaño reducido.

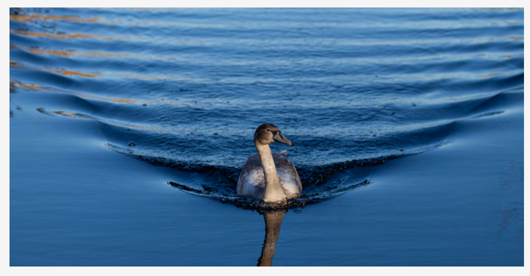
También es posible conseguir lo contrario: recrear a escala humana algunos fenómenos que tienen lugar a una escala muy pequeña. Por ejemplo, los flagelos que usan muchas bacterias para impulsarse tienen una longitud de unas micras y pueden oscilar varias decenas de veces por segundo. En el laboratorio, pueden modelizarse mediante hélices centimétricas que giran inmersas en glicerina y completan una revolución cada diez segundos. En este caso, la mecánica de los fluidos es la misma porque se respeta la relación entre las fuerzas inerciales y la viscosidad: si aumentamos el tamaño del flagelo, hay que reducir la velocidad de rotación.

En ambos casos, es posible recrear el régimen natural (planetario o biológico) en un sistema muy simplificado gracias a la noción de semejanza. Por desgracia, no siempre puede obtenerse una semejanza exacta. Es el caso, por ejemplo, de los fenómenos que ocurren a gran escala y están dominados por la inercia, al ser la viscosidad muy baja. Así, modelizar en el laboratorio el flujo de aire alrededor del ala de un avión que vuela a velocidad de crucero (unos 800 kilómetros por hora) entraña una gran dificultad. Y es que reducir el tamaño del ala concede más peso a los efectos viscosos, y para solucionarlo ¡habría que multiplicar la velocidad por el mismo factor usado en la reducción!

En el estudio experimental de los vórtices jovianos nos enfrentamos a un problema similar. Es posible compensar en parte la disminución del tamaño del vórtice aumentando la velocidad de rotación (un día joviano dura un poco menos de diez horas, mientras que nuestro experimento completa una vuelta en tan solo doce segundos), pero ese aumento no basta para reproducir de forma rigurosa el equilibrio de fuerzas presente en la atmósfera de Júpiter: nuestro tanque debería girar muchísimo más rápido. Esa inevitable discrepancia entre el experimento y la realidad puede interpretarse como un cambio en la viscosidad del fluido. Es como si, en nuestro experimento, Júpiter estuviera hecho de miel, una sustancia mucho más viscosa que los gases de la atmósfera joviana. En consecuencia, el flujo que estudiamos es mucho más plácido que el real, aunque a priori comparta las mismas propiedades a gran escala.

Cuando resulta imposible respetar todos los equilibrios de fuerzas, hay que hacer concesiones y centrarse en los más importantes, para luego variar el resto de parámetros y estudiar la respuesta del sistema. Comparando los resultados del experimento con las observaciones, uno puede extrapolarlos a los sistemas reales.





Las islas Sándwich, en el océano Atlántico, causan la formación de estelas atmosféricas que quedan reflejadas en las nubes. Un cisne traza el mismo tipo de figuras en el agua, lo que constituye un ejemplo de la idea de semejanza.

de un año) para realizar sus cálculos y resulta más difícil separar los distintos efectos. En 2015, Moritz Heimpel, de la Universidad de Alberta, y sus colaboradores simularon por primera vez el interior líquido de Júpiter y su atmósfera, reproduciendo al mismo tiempo chorros zonales profundos y vórtices superficiales. Todas esas estrategias son complementarias. Si sus resultados convergen, desvelarán el secreto de la Gran Mancha Roja de Júpiter.

Los vórtices flotantes que hemos discutido hasta ahora están asociados al entorno joviano. Desprenden un aroma exótico a mundos lejanos con condiciones extremas. Sin embargo, los factores que contribuyen a la formación y estabilidad de los remolinos de Júpiter también están presentes en otros muchos sistemas geofísicos y astrofísicos. Dada la universalidad de los mecanismos de la dinámica de fluidos, esperaríamos observar vórtices flotantes en otros lugares.

Vórtices flotantes en los océanos

Y, de hecho, eso es lo que ocure. Hallamos un ejemplo en los océanos terrestres, que se encuentran sometidos a la rotación del planeta y están estratificados a escala global como resultado de las variaciones de salinidad y temperatura. La hipótesis de los vórtices flotantes en Júpiter aún no se ha confirmado, pero la existencia de ese tipo de remolinos en nuestros océanos está fuera de toda duda. Los más conocidos son los *meddies* del océano Atlántico. (*Meddy* es la contracción de la expresión inglesa *Mediterranean eddy*, «remolino mediterráneo».)

Se trata de grandes anticiclones de agua caliente y salada, con diámetros que oscilan entre 40 y 100 kilómetros y espesores de entre 600 y 1000 metros. Flotan aproximadamente a un kilómetro de profundidad bajo la superficie oceánica y, debido a su forma, también nos referimos a ellos como cuerpos lenticulares de agua.

Su descubrimiento en las Bahamas a finales de los años setenta constituyó toda una sorpresa. La dinámica profunda de nuestros océanos no puede apreciarse a simple vista, ni siquiera de forma cualitativa, y eso explica que estos remolinos oceánicos pasaran desapercibidos durante tanto tiempo. Sin embargo, una vez detectados, son mucho más fáciles de caracterizar que los de Júpiter, aunque ello requiera expediciones marítimas de gran envergadura.

Por ejemplo, los *meddies* suelen generar anomalías detectables, del orden de 10 centímetros, en la elevación de la superficie del mar. La elaboración de perfiles verticales de temperatura y salinidad también ayuda a identificarlos, y así fue como se descubrieron. Tras su hallazgo, los científicos usaron boyas submarinas para observar su evolución durante semanas.

En la actualidad, la formación de los *meddies* se asocia a los trasvases de agua entre el océano Atlántico y el mar Mediterráneo que se producen a través del estrecho de Gibraltar. El agua del Mediterráneo, más densa que la del Atlántico, se adentra en el golfo de Cádiz y se hunde por el talud continental hasta alcanzar cierta profundidad de equilibrio (donde las frías aguas oceánicas poseen la misma densidad que las mediterráneas, más cálidas, pero también más saladas). Entonces la corriente se desplaza en horizontal y comienza a girar en sentido anticiclónico por la acción de la fuerza de Coriolis. En el seno del remolino resultante, las velocidades de rotación pueden llegar a 50 centímetros por segundo. Una vez formado, el vórtice se separa de la corriente y mantiene su masa de agua mediterránea aislada de los abismos circundantes.

Cada año, el proceso descrito genera entre 15 y 20 *meddies* con una vida media de 1,7 años. Algunos no acaban de formarse y desaparecen enseguida, al interactuar con corrientes oceánicas o chocar contra montes submarinos. Pero otros logran escapar de la cuenca oceánica de Canarias y atraviesan el Atlántico a una velocidad de unos 3,5 kilómetros al día, hasta estrellarse contra las costas de Sudamérica al cabo de cuatro o cinco años. Y aquí nos volvemos a topar con una de las señas de identidad de los vórtices flotantes, que ya destacábamos al hablar de la Gran Mancha Roja: su asombrosa persistencia en un entorno caótico.

Los *meddies* forman parte de la circulación oceánica global. Debido a su tamaño y longevidad, transportan ingentes cantidades de calor y de sal (hasta 100.000 millones de toneladas por vórtice) a lo largo de grandes distancias. Así pues, aportan un suministro constante de sal al Atlántico norte. Sin esa contribución, la circulación oceánica global que ayuda a redistribuir el calor del sol desde los trópicos hacia el Polo Norte, llamada termohalina, podría debilitarse. Y eso conduciría a temperaturas más bajas en regiones que hoy gozan de un clima templado, como el noroeste de Europa. Aunque la circulación oceánica global depende de muchos otros factores, como la cantidad de agua

dulce liberada por el deshielo en el Polo Norte, los *meddies* podrían desempeñar una función apreciable. Por tanto, quizá sean relevantes para la evolución climática del planeta.

Un fenómeno universal

Gracias a la proliferación de expediciones marítimas, se han observado vórtices flotantes similares a los *meddies* (si bien de menor tamaño) en otros lugares del mundo, lo que vuelve a poner de manifiesto la universalidad de estas estructuras. Por ejemplo, se han hallado remolinos así en la corriente del Golfo, el océano Ártico o el golfo de Vizcaya. Y también se han descubierto cuerpos lenticulares de agua del mar Rojo flotando en el mar Arábigo.

Asimismo, se han identificado otras estructuras sujetas a la misma dinámica de fluidos en la superficie de los océanos. Es el caso de los remolinos de agua del Amazonas (dulce y, por lo tanto, menos densa que el agua de mar), que remontan las costas sudamericanas hasta el golfo de México y transportan grandes cantidades de nutrientes, para alegría de peces y pescadores. Los oceanógrafos están estudiando con detalle todas esas estructuras.

Pero el fenómeno de los vórtices flotantes no se limita a Júpiter y a los océanos terrestres. También podría manifestarse en los discos protoplanetarios, estructuras de gas y polvo que giran en torno a estrellas jóvenes y en cuyo seno se forman los planetas. La distribución del polvo y la gravedad de la estrella contribuyen a la estratificación del disco. Así pues, se dan todos los ingredientes necesarios para que surjan vórtices flotantes de gas y polvo. Incluso podrían constituir las semillas de los futuros planetas, al causar la rápida aglomeración de material de tamaño micrométrico. Aunque este escenario aún suscita acalorados debates, los estudios de Júpiter demuestran que disponemos de numerosos medios, tanto teóricos como experimentales, para poner a prueba modelos de fenómenos que suceden muy lejos de nuestros laboratorios.

Dafné Lemasquerier es estudiante de doctorado en el Instituto de Investigación de Fenómenos Fuera del Equilibrio (IRPHÉ) de Marsella.



Benjamin Favier es investigador del Centro Nacional de Investigaciones Científicas de Francia (CNRS) en el IRPHÉ.



Michael Le Bars es director de investigación del CNRS en el IRPHÉ.



EN NUESTRO ARCHIVO

La Gran Mancha Roja de Júpiter. Agustín Sánchez Lavega en *IyC*, septiembre de 1990.

Juno sobre Júpiter. Tilmann Althaus en *IyC*, enero de 2018.

El enigma de las bandas de Júpiter. Simon Cabanes, Benjamin Favier y Michael Le Bars en *IyC*, enero de 2018.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas

EDICIONES
Anna Ferran Cabeza, Javier Grande Bardanca, Yvonne Buchholz

EDITA

Prensa Científica, S. A.
Valencia, 307, 3.º 2.ª
08009 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

PRODUCCIÓN

InboundCycle
Plaza Francesc Macià, 8-9, 7B
08029 Barcelona (España)
Teléfono 936 116 054

PUBLICIDAD

Prensa Científica, S. A.
Teléfono 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

ASESORAMIENTO Y TRADUCCIÓN:

Andrés Martínez: *Apuntes* y *Los primeros sonidos de la vida*; **José Óscar Hernández Sendín:** *Apuntes*; **Javier Grande:** *El universo visto desde la Tierra*; **Fabio Teixidó:** *Una maravilla mecánica del mundo antiguo*, *La gran mancha roja de Júpiter en el laboratorio* e *Incendios boreales*; **Miguel A. Vázquez-Mozo:** *El tiempo de la mecánica bohmiana*; **Ana Mozo:** *Afirmaciones dudosas sobre la salud*; **Gonzalo Claros:** *La vida secreta de las células*; **J. Vilardell:** *La bujía de Lavoisier*.

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF
Laura Helmuth

PRESIDENT
Kimberly Lau

EXECUTIVE VICE PRESIDENT
Michael Florek

ATENCIÓN AL CLIENTE

Teléfono 935 952 368
contacto@investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:
1 año 75€ / 2 años 140€

La suscripción incluye el acceso completo a la hemeroteca digital (todos los números publicados desde 1976).

Ejemplares sueltos: 6,50 euros

Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665



BIOLOGÍA CELULAR

LA VIDA SECRETA DE LAS CÉLULAS

Diana Kwon | Las técnicas punteras de microscopía, como la criotomografía electrónica, ya permiten espiar las abarrotadas entrañas celulares en todo su esplendor

S. ALBERT ET AL./PNAS (CC BY 4.0)

Durante unas cuantas semanas de 2017, la bioquímica Wanda Kukulski, de la Universidad de Berna, se dedicó a mirar con asiduidad una clase inusual de películas: vídeos de las entrañas de las células. Estaban hechos con una técnica denominada criotomografía electrónica (crioTE) con la que se ven a gran resolución las proteínas dentro de las células. Gracias a un nivel de detalle sin precedentes, observaron toda clase de cosas sorprendentes, como el funcionamiento interno de las células y sus compartimentos. Kukulski recuerda que «estaba tan abrumada por la belleza y la complejidad que, entrada la noche, seguía contemplándolos como si fueran documentales».

Desde hace poco, las técnicas de formación de imágenes como la crioTE permiten observar las moléculas biológicas en su entorno natural. A diferencia de los métodos más antiguos en los que su estudio implicaba sacarlas de su nicho, se ofrece una visión holística de las proteínas y de otras moléculas en el interior del ambiente celular. Estas técnicas se están volviendo cada vez más populares y complejas a pesar de sus limitaciones (la baja resolución de la crioTE, por ejemplo, impide identificar las moléculas con certeza). Los investigadores que recurrieron a ellas quedaron no solo hipnotizados por la belleza de las imágenes, sino también anonadados por algunos de los secretos que les revelaron, como las tretas bacterianas para infectar las células o la manera en que las proteínas mutadas provocan enfermedades neurodegenerativas como el párkinson.

Cada vistazo al microscopio ofrece una nueva ocasión de explorar un terreno celular ignoto, señala el biólogo estructural Grant Jensen, del Instituto de Tecnología de California en Pasadena, y añade: «Desde luego, me siento privilegiado cuando soy el primero en observar algo».

Otros investigadores comparten su gozo, como la biofísica Elizabeth Villa, de la Universidad de California en San Diego, que recuerda su incontenible excitación la primera vez que observó las estructuras celulares con la crioTE: «Parecía como si de repente fuéramos *paparazzi* a los que abrieran unas puertas que siempre habían estado cerradas».

En síntesis

La criotomografía electrónica es una de las técnicas punteras que buscan obtener imágenes detalladas de las moléculas biológicas en el interior de las células.

A diferencia de otros métodos en los que es preciso sacar las proteínas y otras moléculas de su nicho, la criotomografía ofrece una visión de ellas dentro de los compartimentos de las células.

A pesar de que aún presenta ciertas limitaciones, varios grupos la han utilizado para examinar la interacción entre los componentes celulares y las proteínas asociadas a las enfermedades neurodegenerativas. Y en el futuro ayudará a observar la acción de los fármacos en las entrañas moleculares de las células.

De los cristales al contexto

Durante décadas, para ver las proteínas, los virus y otras entidades biológicas, se vino utilizando fundamentalmente la cristalografía de rayos X. La técnica consiste en hacer que las moléculas formen cristales estáticos y bien ordenados para luego bombardearlos con haces intensos de rayos X. Así se descubrió la naturaleza helicoidal del ADN y la estructura de más de 100.000 proteínas. Pero tiene sus limitaciones: la cristalización de las moléculas es difícil y farragosa, y no siempre factible.

Estos inconvenientes se han resuelto con la criomicroscopía electrónica (crioME), una técnica que revela la estructura de las biomoléculas congeladas tras aislarlas de su entorno. En la crioME, las muestras se riegan con haces de electrones. Aunque se la ridiculizó al principio con el apelativo «borrosología» porque las imágenes producidas parecían desenfocadas, los avances en la preparación de las muestras y el procesamiento de las imágenes han llevado la resolución hasta 1,2 ángstroms ($1{,}2 \times 10^{-10}$ metros), lo suficiente para discriminar cada uno de los átomos.

Como esta «revolución de la resolución» comenzó a extenderse por la crioME, allá por el 2013 muchos científicos decidieron empezar a utilizarla. Desde entonces ha servido para resolver la estructura de más de 10.000 moléculas biológicas. Las proteínas de la membrana plasmática, en concreto, han despertado especial interés, porque muchas resultan esenciales para desentrañar las enfermedades y desarrollar fármacos. Según Jensen, el avance «permitió que muchas personas de gran talento se pusieran a buscar un nuevo campo, más rico y maduro, en el que se producirían avances verdaderamente impactantes». Ese campo resultó ser la crioTE.

«Las funciones biológicas surgen de la interacción de todas las moléculas que habitan en el ambiente intracelular»

Sus primeros partidarios buscaban una técnica que pudiera mostrar las moléculas biológicas no solo con gran detalle, sino también con el aspecto que tendrían en el interior de las células. Al igual que la crioME, la crioTE necesita un microscopio electrónico y emplea un método de preparación de las muestras conocido como vitrificación. Esta consiste en el enfriamiento rápido del agua que rodea una muestra, de tal forma que se queda congelada en un estado seudocristalino en vez de como cristales de hielo. No obstante, a diferencia de la crioME convencional, que necesita que las muestras estén purificadas, la crioTE permite capturar estas moléculas *in situ*.

Con la crioME se forma una imagen tridimensional al combinar los resultados de fotos bidimensionales con muchísimas moléculas sueltas en diferente orientación. En cambio, con la crioTE se toman numerosas instantáneas de un solo fragmento de muestra plagado de moléculas desde muchos ángulos diferentes, con lo que el entorno se mantiene intacto.

Es como obtener la fotografía de una multitud, en vez del retrato de una persona. Por esta razón ha sido bautizada como «sociología molecular» por los pioneros de la técnica, el biofísico Wolfgang Baumeister y sus colaboradores del Instituto Max Planck de Bioquímica, en Martinsried (Múnich).

Después de todo, las proteínas se comportan así. Para Villa, «las proteínas son gregarias: en cada momento se encuentran formando un complejo con otras diez, aproximadamente». Y nos confiesa que, después de observar tales interacciones con la crioTE, «me resultaba imposible plantearme el estudio de cualquier otra proteína aislada».

La tomografía electrónica (la toma de imágenes de una muestra desde diferentes ángulos con un microscopio electrónico) se viene utilizando desde la década de los 60 del siglo pasado, pero hubo que esperar hasta los 90 para que el método madurara lo suficiente. Uno de los desafíos residía en lo dañinos que resultaban los chorros de electrones para las muestras biológicas, lo que dificultaba la captura de una cantidad suficiente de instantáneas que proporcionara una imagen clara y definida. Con los últimos procedimientos de microcorte de las muestras y con los métodos computacionales se ha mejorado la nitidez de las imágenes. Una de las técnicas es la crioablación con haces de iones focalizados (crioFIB), que corta las muestras en rodajas delgadísimas denominadas laminillas. Baumeister puntualiza que el coste y la experiencia técnica necesaria para utilizar la crioTE, sobre todo en combinación con otros métodos como la crioablación con FIB, resultan prohibitivos para muchos laboratorios.

Las primeras demostraciones de la crioTE del grupo de Baumeister incluían instantáneas de las células de *Dictyostelium*, una ameba que vive en el suelo y engulle bacterias. Revelaron, entre otras cosas, unas características desconocidas hasta ahora de las intrincadas redes de proteínas que forman el Citoesqueleto de la ameba, como la manera en que cada filamento interacciona con otro y se pegan a estructuras específicas de su membrana celular.

Baumeister comenta que «raramente se pueden asignar funciones biológicas o celulares a cada molécula porque cada función surge de la interacción de todas las moléculas que habitan en el ambiente intracelular. En esto radica el potencial de la crioTE para la investigación: mires donde mires, todo son sorpresas».

Células gregarias

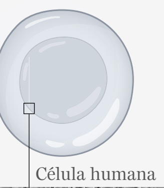
Los primeros trabajos con la crioTE se hicieron sobre todo con procariotas unicelulares, como las bacterias, que suelen ser más pequeñas y delgadas que las complejísimas células de los eucariotas.

En un estudio de 2006, Jensen describió junto a su equipo la primera estructura completa del motor que impulsa el flagelo, un apéndice parecido a un látigo que presentan algunas bacterias. Gracias a la crioTE descubrieron la estructura tridimensional de este motor con 20 piezas en *Treponema primitia*

(una bacteria del intestino de las termitas) y detallaron la ubicación de cada parte en la membrana bacteriana. Jensen y sus colaboradores también han descubierto algunos detalles muy relevantes de las fimbrias (las protuberancias que utilizan los microorganismos para muchas funciones, como fijarse a las células que van a infectar y secretarles sustancias). El año pasado publicaron un atlas digital en abierto que resalta la enorme cantidad de detalles descubiertos con la crioTE relacionados con las células bacterianas y de otros procariotas.

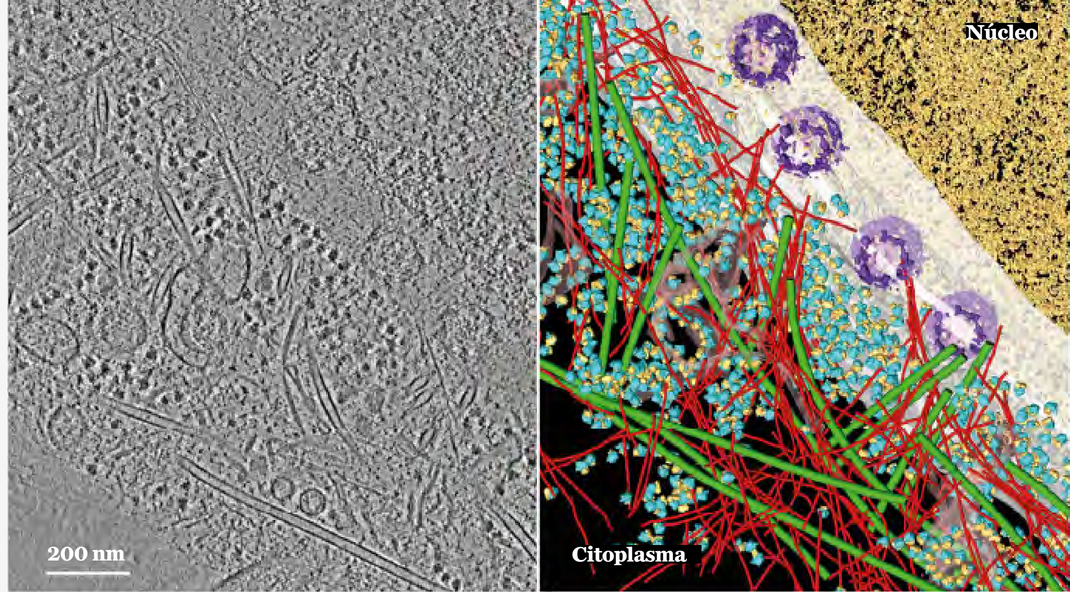
Más recientemente, los científicos se han atrevido a grabar imágenes de las células eucariotas, que son grandiosas comparadas con las procariotas. Ha sido posible, en buena medida, gracias a la llegada de la crioablación por FIB, que permite cortar las células en rodajas muy finas antes de colocarlas en el microscopio electrónico. Baumeister y sus colaboradores utilizaron este cóctel de métodos para visualizar la distribución de las moléculas cerca del núcleo en una célula humana (*véase el recuadro* «Primicia intracelular»). Con su trabajo revelaron que unos filamentos de grosor nanométrico que no se habían visto hasta entonces daban soporte estructural al núcleo, lo que lo convertía en uno de los orgánulos más rígidos de las células animales.

Mediante el empleo de la ablación con FIB, la crioTE captura solo segmentos delgadísimos de las células eucariotas. Por eso hay que encontrar la manera de localizar con precisión las moléculas de interés dentro del inmenso y atestado escenario celular. Una solución consiste en identificar las proteínas marcándolas primero con fluorescencia al microscopio óptico y, a continuación, utilizar la crioTE para centrarse en los detalles más pequeños de determinadas secciones.



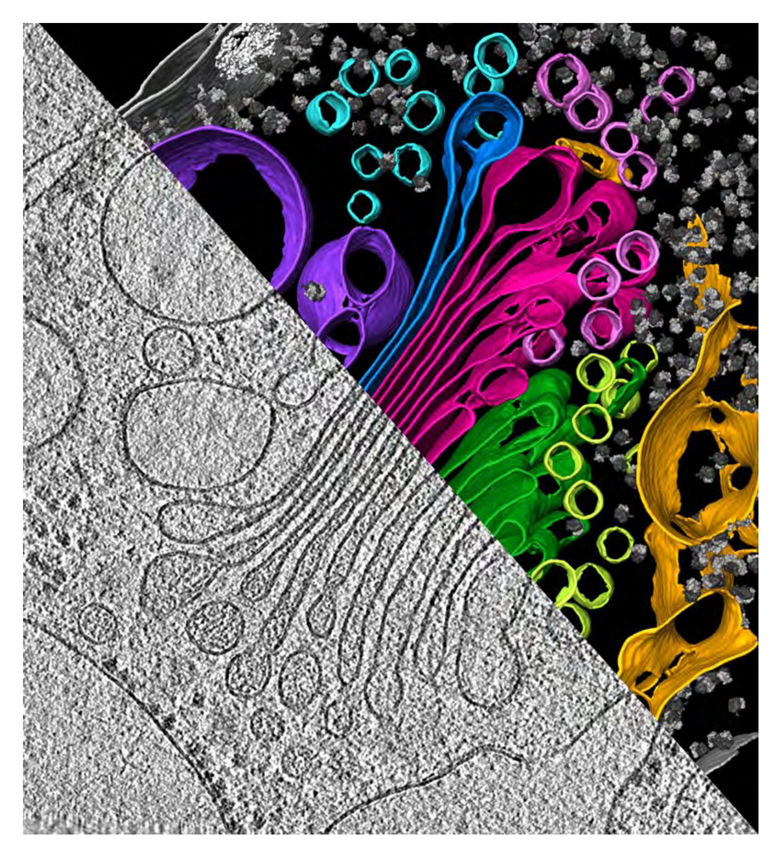
PRIMICIA INTRACELULAR

La criotomografía electrónica se ha usado para escudriñar las lindes del núcleo de una célula humana (*izquierda*) y determinar con precisión las estructuras internas y externas (*abajo a la derecha, vista anotada*).



- Retículo endoplásmico, que interviene en la fabricación de las proteínas.
- Filamentos de actina, que aportan estructura y forma.
- Envoltura nuclear, que sirve de linde.
- Complejo del poro nuclear, que importa y exporta las moléculas nucleares.
- Ribosomas, que fabrican las proteínas.
- Microtúbulos, que mantienen la forma y ayudan a transportar las moléculas y las estructuras celulares.

FUENTE: «VISUALIZING THE MOLECULAR SOCIOLOGY AT THE HELA CELL NUCLEAR PERIPHERY». J. MAHAMID ET AL. EN *SCIENCE*, VOL. 351, PÁGS. 969-972, FEBRERO DE 2016



UNA CÉLULA DE ALGA revela sus secretos con la crioTE: el retículo endoplásmico, que fabrica las proteínas (*amarillo*); los sacos del aparato de Golgi, que modifica y empaqueta las proteínas para su transporte (*verde* y *fucsia*), y las vesículas transportadoras de proteínas (*circulitos de diferentes colores*).

Villa y sus colaboradores han utilizado esta combinación de técnicas para solucionar la estructura de la proteína LRRK2, relacionada con las formas hereditarias de la enfermedad de Parkinson. En su trabajo revelaron que la versión mutada se adhería a unos componentes del citoesqueleto conocidos como microtúbulos y formaba una doble hélice en torno a ellos. Con estos hallazgos, el equipo también sugirió que la LRRKW mutada podría adquirir una conformación que favoreciera este tipo de fijación, lo que posiblemente dé problemas porque se bloquean las moléculas que utilizan los microtúbulos para transportar sustancias importantes para la célula.

Algunos grupos como el de Baumeister han utilizado este método para examinar la interacción entre las proteínas asociadas a las enfermedades neurodegenerativas (como la enfermedad de Huntington y la enfermedad de las motoneuronas denominada esclerosis lateral amiotrófica, o ELA) y los componentes celulares como el retículo endoplásmico (RE), una pieza importante de la maquinaria celular que sirve para sintetizar las proteínas. Encontraron que cada uno de los agregados proteicos neurotóxicos que intervienen en estas enfermedades se comportaba de muy diferente forma dentro de las células. En la enfermedad de Huntington, los agregados de una forma mutante de la huntingtina parecen desorganizar el RE, mientras que, en la ELA, los agregados de una proteína anómala alteran la bioquímica celular al activar la maquinaria de degradación de las proteínas.

En el futuro, tales métodos se podrán utilizar para conocer mejor cómo funcionan los tratamientos porque permitirán observar la acción de los fármacos en las entrañas moleculares de las células. En las primeras demostraciones, Julia Mahamid, del Laboratorio Europeo de Biología Molecular en Heidelberg, y sus colaboradores consiguieron vislumbrar en una célula bacteriana la fijación de los antibióticos a los ribosomas (los orgánulos que fabrican las proteínas). Lograron esta proeza al llevar la resolución de la crioTE hasta 3,5 ángstroms.

Kukulski, que no participó en ese trabajo, piensa que «seguramente sea lo más avanzado que se puede conseguir [con la crioTE]». Aunque nos advierte de que el ribosoma es ubicuo en la célula y ya está bien caracterizado, por lo que es fácil de reconocer y estudiar, mientras que interpretar las imágenes de una estructura celular infrecuente o menos conocida sigue siendo una tarea muy difícil.

Combinaciones poderosas

El campo de la crioTE está creciendo muy rápido a pesar de que la técnica sigue teniendo sus limitaciones, como el problema de la resolución. Aunque el nivel de detalle ha mejorado enormemente en los últimos años, con la crioTE no se alcanza la resolución atómica de

la crioME. Según Hong Zhou, biofísico de la Universidad de California en Los Ángeles, «la crioTE está donde la crioME estaba a principios de los años 90, antes de que se alcanzara la resolución atómica».

Zhou cree que con las prestaciones actuales de la crioTE resulta difícil identificar correctamente cada molécula de una célula. Por lo tanto, a menos que se centren en las estructuras que ya están bien caracterizadas, como el ribosoma, las hipótesis sobre lo que se ve con la técnica podrían resultar incorrectas. Y añade que «la probabilidad juega en contra. Es muy fácil equivocarse».

Para eludir el problema de la resolución, Zhou ha preferido forzar los límites de la crioME convencional. Su equipo describió recientemente un programa semiautomático denominado cryoID, que fusiona la crioME con otras técnicas. Una de ellas implica abrir las células por ruptura con un método que consigue que parte de las proteínas permanezcan dentro del medio celular original; de este modo se ven las proteínas en su estado casi natural. A pesar de centrarse en la crioME, Zhou afirma que la crioTE es el futuro: «Lo considero [a este método] una etapa intermedia hacia dicho objetivo».

Otra limitación de la crioTE es su escasa representatividad, porque, como dice Villa, «el secreto mejor guardado de la tomografía es que cuando se contempla una célula de mamífero, la imagen abarca menos del 0,1 por ciento de la célula». Esto significa que solo se verán segmentos diminutos de los orgánulos grandes, como el núcleo. Para llenar este vacío y mostrar las células enteras, los científicos como Harald Hess, biofísico del Campus de Investigación Janelia del Instituto Médico Howard Hughes en Ashburn, Virginia, están utilizando técnicas diferentes a la crioTE denominadas microscopías de altísima resolución electrónica y de fluorescencia. Con estos métodos, Hess y sus colaboradores consiguen tener una nueva perspectiva de la interacción entre los diferentes componentes celulares. En un estudio publicado a comienzos de octubre de 2021, demostraron que podían mapear la organización de 35 tipos de orgánulos con la ayuda del aprendizaje computacional, una forma de inteligencia artificial que entrenaron para identificar estos componentes en muchas muestras.

Otros investigadores están combinando la crioTE con otra técnica denominada tomografía de rayos X, que captura imágenes de las células enteras. Así consiguen examinar la estructura de los componentes más grandes, como las mitocondrias o los núcleos, para a continuación centrarse solo en cada área interesante.

No obstante, juntar estos métodos requiere dinero y pericia. Por encima de todo está que ambas técnicas bombardean las muestras con radiación dañina, por lo que la transferencia de una muestra desde una técnica a otra se convierte en un desafío, comenta Eva Pereiro, que investiga en el haz del sincrotrón ALBA, en Barcelona, para producir rayos X idóneos para la tomografía.

Algunos laboratorios ya han logrado esta proeza. Maria Harkiolaki, investigadora principal en el haz del Diamond Light Source, un sincrotrón en Didcot, Reino Unido, y sus colaboradores publicaron recientemente un modelo del mecanismo de infección del SARS-CoV-2 gracias al uso de la crioTE y la tomografía de rayos X para elucidar este proceso. Capturaron lo que ocurría tanto en el plano celular como en el molecular y lanzaron una propuesta de cómo se replica el virus en las células de los primates.

Baumeister piensa que la crioTE, al igual que la crioME, acabará mostrando las moléculas biológicas con resolución atómica. Hasta entonces, seguirá investigándose ávidamente qué nuevos conocimientos intracelulares podrían descubrirse con la crioTE y con otros métodos similares. Dado que estas herramientas revelan estructuras que nunca se habían visto, a los investigadores empiezan a acumulárseles nuevos misterios que resolver. «Lo que me encanta de la tomografía es que siempre generamos más preguntas que respuestas», concluye Villa.

Diana Kwon, periodista científica, escribe sobre temas de salud, biología y ciencias afines.



Artículo original publicado en *Nature*, traducido y adaptado con el permiso de *Nature Research Group* © 2021.

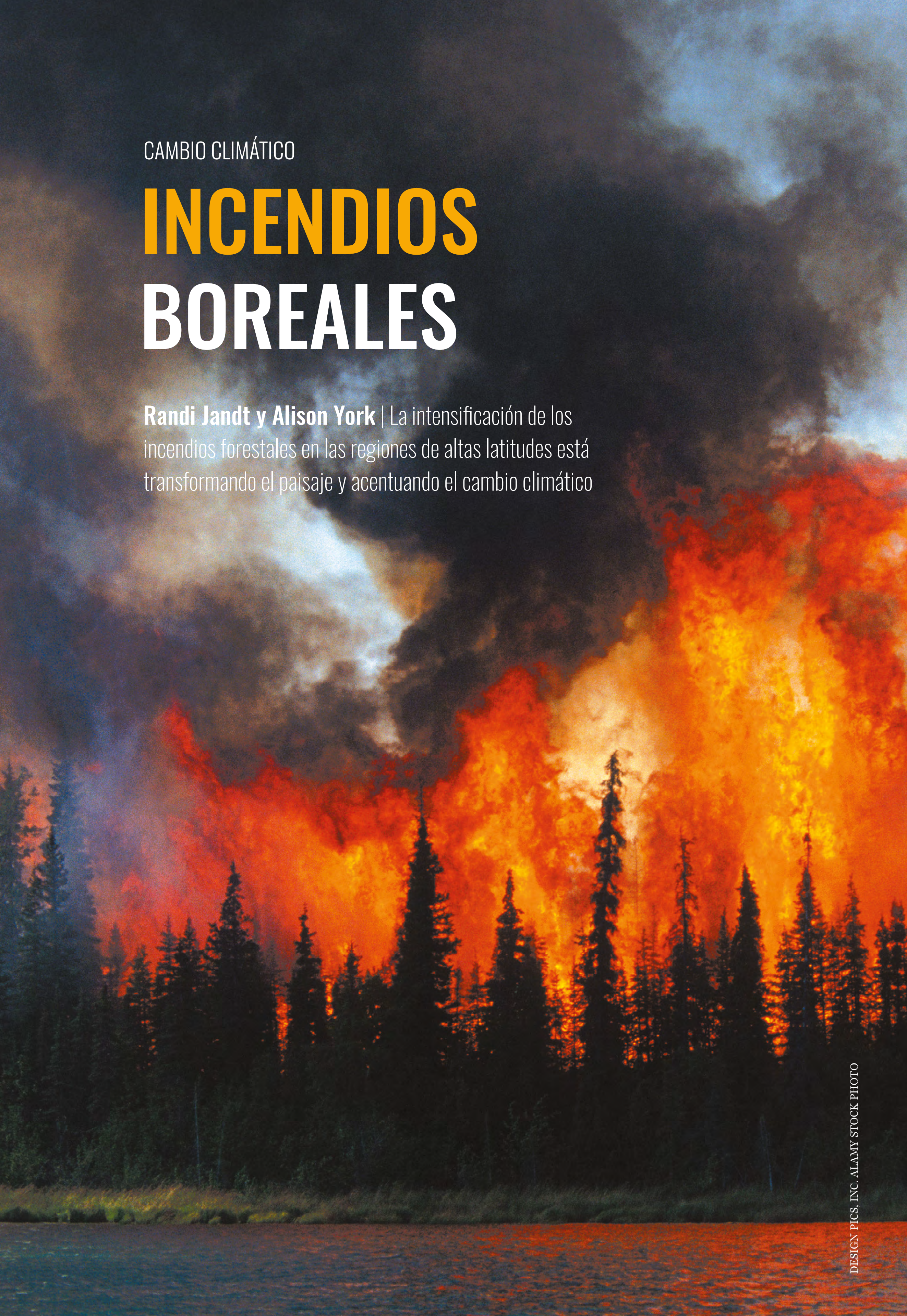
Con la colaboración de nature

EN NUESTRO ARCHIVO

Breve historia de la criomicroscopía electrónica. Eva Nogales, en *IyC*, mayo de 2016.

Filmar el movimiento de las moléculas. Petra Fromme y Spence John C. H. en *IyC*, julio de 2017.

La vida íntima de las proteínas celulares. Oriol Gallego en *IyC*, julio de 2018.



CAMBIO CLIMÁTICO

INCENDIOS BOREALES

Randi Jandt y Alison York | La intensificación de los incendios forestales en las regiones de altas latitudes está transformando el paisaje y acentuando el cambio climático

DESIGN PICS, INC. ALAMY STOCK PHOTO

En síntesis

En los últimos años, la frecuencia, la intensidad y la extensión de los incendios forestales de las regiones boreales han ido en aumento.

Estos grandes fuegos arrojan una enorme cantidad de dióxido de carbono a la atmósfera, la mayor parte procedente de la combustión del grueso mantillo de restos orgánicos que cubre el suelo forestal.

Los investigadores se afanan por comprender las repercusiones de esas perturbaciones en el clima y en los ecosistemas boreales de la tundra y la taiga.

El 5 de junio de 2019, los rayos de una tormenta eléctrica primaveral inusualmente temprana provocaron un incendio en el interior del Refugio Nacional de Vida Silvestre de Kenai, en la zona central del sur de Alaska. Las altas temperaturas de finales de mayo habían revertido los efectos de una primavera húmeda y habían secado en poco tiempo el suelo forestal. El consiguiente incendio en la zona de Swan Lake, a unos ocho kilómetros al noreste de Sterling, se extendió sin tregua durante un mes bajo unas condiciones climáticas extraordinariamente cálidas. Hacia el 9 de julio, más de 400 personas combatían las llamas tras haber ardido más de 40.000 hectáreas. El 17 de agosto, un cambio en la dirección del incendio debido a los fuertes vientos causó numerosas evacuaciones. El viento también derribó líneas eléctricas, lo que originó nuevos incendios como el de Deshka Landing y el rápido incendio de McKinley, que engulló más de 130 hogares, negocios y edificios anexos. Afortunadamente, nadie perdió la vida.

El incendio de Swan Lake se mantuvo activo hasta octubre, cuando unas lluvias tardías permitieron finalmente a los bomberos contener las llamas después de que unas 67.500 hectáreas hubieran quedado calcinadas. Durante los cinco meses que duró el incendio, la policía estatal se vio obligada a cortar repetidas veces la autopista de Sterling, la principal vía de la zona. Las autoridades sanitarias advirtieron sobre un humo «nocivo» o incluso «peligroso», cargado de minúsculas partículas que podían perjudicar los pulmones durante una tercera parte de los días de junio, julio y agosto en la zona central del sur de Alaska, donde se aloja el 60 por ciento de la población del estado. Las empresas dependientes del turismo perdieron el 20 por ciento de sus ingresos estacionales.

La nieve y el frío invernales concedieron un respiro, pero, en enero de 2020, un equipo de apertura y mantenimiento de senderos advirtió de la presencia de humo en la zona donde se había producido el incendio de Deshka Landing. Al llegar, los bomberos descubrieron que el incendio nunca había llegado a extinguirse del todo. Había ardido bajo tierra durante cuatro meses y había resurgido a través de la capa de nieve. En junio, cuando el estado se volvía nuevamente cálido y seco, se informó de la presencia de humo en la zona donde se había desencadenado el incendio de Swan Lake. Tras haber ardido sin llamas durante los ocho meses de invierno y primavera, se había reavivado.

Los denominados incendios zombi, los que resurgen pese a haberse dado por extinguidos, aumentan a medida que Alaska adolece de unas temporadas de incendios cada vez más cálidas y prolongadas como consecuencia del cambio climático. Entre 2005 y 2017, los gestores de incendios de Alaska y los Territorios del Noroeste de Canadá informaron de 48 incendios zombi, o incendios remanentes, que habían sobrevivido el largo invierno. Mediante la revisión de imágenes de satélite anteriores, Rebecca Scholten, especialista en teledetección de la Universidad Libre de Ámsterdam que colabora con los gestores de incendios de Alaska, ha descubierto otros 20 de los que no existía ningún registro. El inusual fenómeno se produce en las latitudes boreales y supuso el origen de los incendios extraordinariamente tempranos que tuvieron lugar en el norte de Siberia en marzo de 2020 y marzo de 2021.

Los incendios zombi pueden ser recurrentes porque los árboles de los ecosistemas boreales no constituyen el único combustible disponible, ni siquiera el principal. Tanto la tundra, desprovista de árboles, como la taiga, situada más al sur, están tapizadas por un grueso manto orgánico de vegetación viva y muerta. Esa densa capa turbosa, denominada mantillo, es el resultado de la acumulación estival de musgo superficial muerto y restos orgánicos cuya descomposición se ve ralentizada por las bajas temperaturas de las latitudes septentrionales. El mantillo, cuyo espesor oscila entre 8 y 50 centímetros, puede acumu-



ERIC MILLER, SERVICIO DE INCENDIOS FORESTALES DE ALASKA DE LA OFICINA DE GESTIÓN TERRITORIAL

Cuando un incendio consume la capa superficial aislante, tanto el permafrost como las cuñas de hielo del sustrato quedan expuestos y se deshielan, lo que causa la subsidencia del terreno y la formación de dolinas, como ocurrió tras el incendio en la zona del río Anaktuvuk.

larse durante siglos y se vuelve cada vez más denso y compacto.

La superficie del mantillo consiste en una capa verde compuesta sobre todo por musgos boreales que, al carecer de raíces o sistemas vasculares, extraen la humedad directamente del aire. Su contenido en agua varía casi al mismo tiempo que la humedad relativa; incluso después de haber llovido, al cabo de unas horas el musgo puede haberse secado lo suficiente como para poder arder. Los veranos más largos, cálidos y secos, sumados a los inviernos más cortos que el cambio climático está causando en las latitudes boreales, convierten amplias extensiones de suelo forestal y de árboles en polvorines que los rayos, o las personas descuidadas, pueden incendiar con facilidad.

Tanto la frecuencia como las dimensiones de los incendios forestales en las regiones boreales son cada vez mayores. El fuego, además, provoca cambios en el paisaje y en los ecosistemas. Aparte de suponer un combustible, el mantillo constituye un excelente aislante del sustrato congelado. Tanto es así que el subsuelo de Alaska se ha mantenido congelado desde la época Pleistocena. Por cada 1,25 centímetros de espesor, el permafrost (suelo que permanece bajo cero durante dos o más años) se conserva unos 0,6 grados Celsius más frío. Pero si se quema suficiente mantillo, el permafrost se deshiela y algunas zonas de Alaska se convierten en terrenos blandos que pueden hundirse. Los árboles arraigados en tales terrenos pueden inclinarse en distintos ángulos, como caprichosas torres de Pisa.

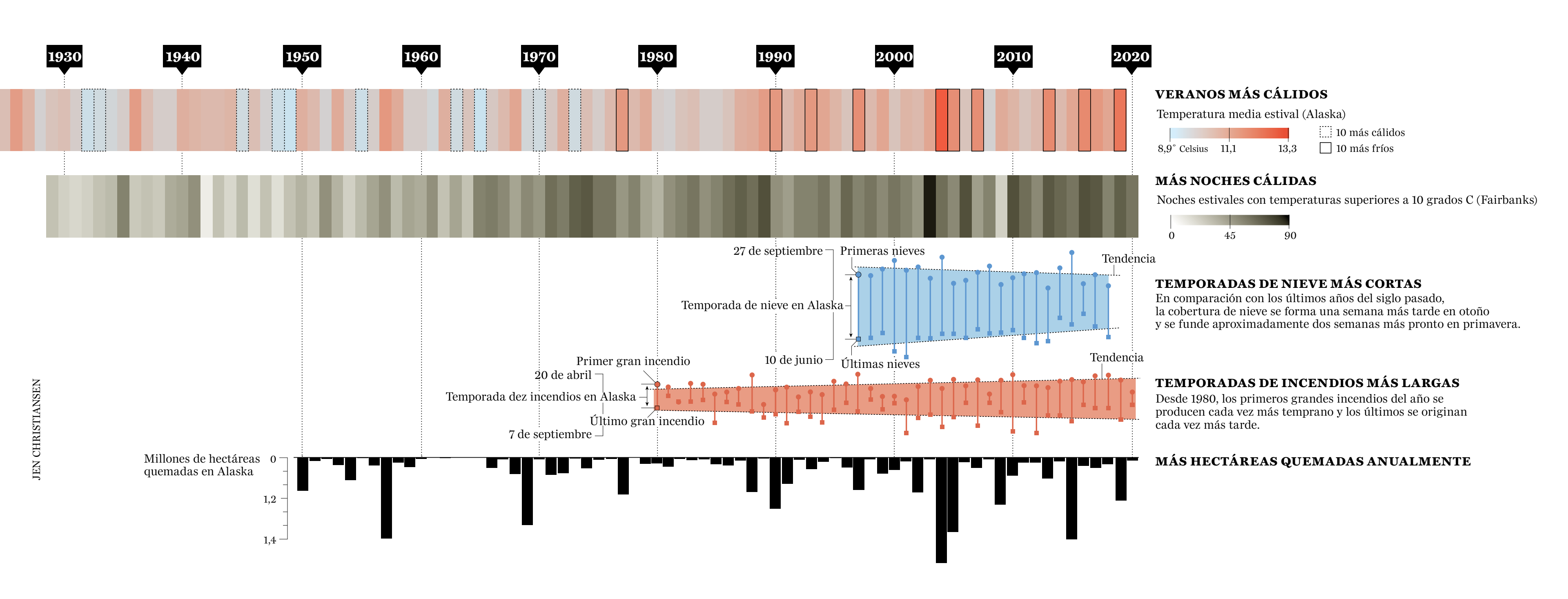
Además, los grandes incendios forestales aceleran el cambio climático debido a que arrojan una enorme cantidad de dióxido de carbono a la atmósfera. La mayor parte proviene del mantillo, no de los árboles. Las gruesas capas que se acumulan en las latitudes boreales albergan entre un 30 y un 40 por ciento del total de carbono almacenado en el suelo de la Tierra. Los devastadores incendios de 2015 en el interior de Alaska, que arrasaron más de 2 millones de hectáreas, liberaron unos 9 millones de toneladas de carbono de la vegetación superficial y 154 millones de toneladas del mantillo, según Christopher Potter de la División de Ciencias de la Tierra de la NASA. (El cálculo incluye el carbono liberado posteriormente como consecuencia de la descomposición y la erosión durante los dos años siguientes.) La cantidad total de CO_2 equivale a la emitida por todos los coches y camiones de California en 2017. A medida que el suelo se descongela, el hielo de las capas inferiores del mantillo se derrite y el agua resultante se infiltra, por lo que el mantillo inferior se seca y es más susceptible de arder en profundidad. Lo más probable es que ese mecanismo de retroalimentación incremente el número de hectáreas quemadas, agrave la salud de millones de personas y acelere más que nunca el cambio climático. Como resultado de tal retroalimentación, la región entera podría pasar de absorber más carbono del que emite a emitir más del que absorbe.

Húmedo y al mismo tiempo seco

Solemos pensar en Alaska como un lugar nevado con pocas probabilidades de incendiarse. Sin embargo, gran parte del estado, especialmente la región interior, presenta un clima continental con inviernos largos y fríos y veranos cálidos relativamente secos. Si sobrevoláramos el interior de Alaska en verano, veríamos un vasto paisaje de bosques, praderas y lagos. Pero tal exuberancia es engañosa, puesto que la región apenas registra precipitaciones. La fusión lenta y continua de la nieve en primavera y el deshielo de la «capa activa», situada inmediatamente debajo del mantillo y que vuelve a congelarse en invierno, proporcio-

UNA SUMA DE FACTORES INTENSIFICA LOS INCENDIOS

El cambio climático fomenta los incendios forestales en Alaska. Como resultado de unas temperaturas más elevadas, especialmente por la noche, la vegetación y el suelo de los bosques se secan, por lo que aumenta la probabilidad de incendios. El calentamiento también acorta las semanas de cobertura de nieve y, por tanto, la sequedad persiste durante la mayor parte del año. El conjunto de factores prolonga la temporada de incendios, lo que conlleva un mayor número de hectáreas quemadas. El fenómeno se observa también a escala global en todas las regiones boreales del planeta.



Fuentes: «Alaska's changing wildfire environment». Z. Grabinski y H. R. McFarland, Consorcio Científico sobre Incendios de Alaska, Centro Internacional de Investigaciones Árticas, Universidad de Alaska, en Fairbanks, 2020; RickThoman, según datos de la NOAA y el Servicio Meteorológico Nacional estadounidense (*temperaturas*); Brian Brettschneider, según datos del Centro Nacional de Datos del Hielo y la Nieve de EE.UU. (*temporadas de nieve*); Zav Grabinski, según datos del Centro de Coordinación Interinstitucional de Alaska (*temporadas de incendios*); RickThoman, según datos del Centro de Coordinación Interinstitucional de Alaska (*hectáreas quemadas*).

ERIC MILLER, SERVICIO DE INCENDIOS FORESTALES DE ALASKA DE LA OFICINA DE GESTIÓN TERRITORIAL





El mantillo que cubre los suelos forestales en las latitudes boreales puede alcanzar hasta 50 centímetros de espesor (*derecha*), y los incendios zombi pueden arder en su interior durante todo un invierno. Mediante la inserción de barras metálicas antes de un incendio se puede calcular cuánto material consumen las llamas (*izquierda*).

nan el agua necesaria para reverdecer, pero la superficie del mantillo puede quedar completamente seca al cabo de una o dos semanas cálidas.

La taiga comprende el 30 por ciento de la superficie forestal mundial, por lo que representa el mayor bioma boscoso de la Tierra. También supone el ecosistema boreal más propenso a quemarse. La taiga del interior de Alaska está dominada por el abeto negro, un árbol pequeño de crecimiento lento que forma densos rodales. Sus ramas descienden hasta alcanzar el mantillo, lo que sirve de escalera para el fuego. Al haber sido la conífera dominante en Alaska durante los últimos 7000 años, el abeto negro se ha adaptado a las llamas: sus piñas se agrupan en el extremo superior del árbol y se abren después de un incendio para arrojar las semillas, lo que permite restablecer el ecosistema.

Durante décadas, los gestores de incendios de Alaska han vigilado los que se iniciaban en áreas remotas y, por lo general, los han dejado evolucionar con el fin de renovar los ecosistemas que dependen del fuego; al fin y al cabo, buena parte de Alaska carece de poblaciones o infraestructuras que deban protegerse. El eficiente enfoque ha ayudado a evitar que crezcan bosques desmedidos o con demasiada madera muerta, un problema común en los otros 48 estados. La estrategia también permite a los investigadores observar el modo en que el clima influye en los incendios forestales sin que haya una intervención humana importante.

Hasta hace poco, los incendios solían destruir los árboles sin penetrar demasiado en el mantillo, dado que la humedad de las capas inferiores evitaba que ardiera el subsuelo. También se daban casos de incendios más graves y profundos cuando las condiciones eran especialmente cálidas y secas. Tras la perturbación suele emerger un mosaico de praderas, matorrales y bosques leñosos (abedules y álamos) que reemplazan a los abetos. Hoy se observa un aumento de tales fenómenos extremos. En los últimos años, los incendios forestales en Alaska han batido récords y han quemado más hectáreas con mayor intensidad y durante más tiempo. Las temporadas en las que arden 400.000 hectáreas o más son dos veces más frecuentes que hace 30 años.

La región ártico-boreal, en su conjunto, se está calentando entre 1,5 y 4 veces más rápido que las zonas templadas. Alaska se ha calentado 2,2 grados Celsius en los últimos 50 años, y los trabajos publicados en 2021 por David Swanson, del Servicio de Parques Nacionales de la Región de Alaska, demuestran que el calentamiento se ha acelerado aún más desde 2014. Esa «amplificación ártica» responde en buena parte al deshielo marino y terrestre, que deja al descubierto más áreas oscuras de océano y suelo capaces de absorber mucha más luz solar que el hielo o la nieve.

Los inviernos se calientan a mayor velocidad que los veranos, pero el efecto acumula-

tivo implica que la capa de nieve se desarrolla ahora una semana más tarde y se derrite dos semanas antes que en la década de los noventa, por lo que el mantillo permanece seco la mayor parte del año. La temporada de incendios es al menos un mes más larga que hace 30 años, lo que obliga a las instituciones a prolongar los contratos de bomberos y equipos aéreos. En 2016, Alaska alcanzó un récord en cuanto a la duración de la temporada de incendios: el 17 de abril, los bomberos paracaidistas, que descienden en áreas remotas, registraron cerca de Palmer el incendio más temprano que habían visto en sus 57 años de historia. Y la División Forestal de Alaska todavía combatía las llamas cerca de Anchorage a principios de octubre, bajo unos vientos tan fríos que el agua de los cubos de los helicópteros se congelaba.

Los días con temperaturas extremas, estrechamente vinculados a la evolución de los incendios, también aumentan. En 2019, el año de los incendios en las zonas de Swan Lake y McKinley, Anchorage alcanzó 32 nuevos récords y experimentó por primera vez 32 grados Celsius. Según los últimos modelos climáticos, se espera que el número anual de días con temperaturas superiores a 25 grados —un umbral clave para secar la vegetación susceptible de arder— se duplique en el interior de Alaska hacia mediados de siglo.

El incremento de los incendios en latitudes boreales se está produciendo a escala mundial. En 2020 se alcanzó un récord de incendios forestales observados por satélite en el interior del círculo polar ártico, y el año 2019 ocupa el segundo puesto. En Siberia, las estimaciones indican que más de 14 millones de hectáreas quedaron calcinadas en 2020 como consecuencia de más de 18.000 incendios, unas cifras alarmantes. En los alrededores se observaron anomalías térmicas significativas. El 20 de junio, la ciudad de Verjoiansk, situada a la misma latitud que el norte de Alaska, batió su récord: más de 37 grados Celsius. Como resultado de unas precipitaciones regionales notablemente bajas, se produjo el deshielo más temprano desde que comenzaron los registros en 1967. La temporada de incendios en la República de Sajá, en Rusia, dura hoy dos semanas más que hace una década, y los primeros informes indican que la temporada de Siberia en julio de 2021 ha tenido un mayor alcance que durante el mismo período en 2020. En mayo de 2021, Islandia emitió la primera alerta de peligro de incendios forestales del país. Los factores que los alimentan son los mismos que en Alaska.

Permafrost y rayos

El abeto negro arde con facilidad, pero la mayor parte de la biomasa que se incorpora al humo procede del propio mantillo. El suelo forestal puede contener entre 40 y 100 toneladas de combustible por cada 0,4 hectáreas. Los árboles suponen cerca de 30 toneladas por cada 0,4 hectáreas, aunque las llamas suelen consumir principalmente las agujas y las ramas, mientras que dejan en pie los troncos, cuyo material es más denso.

Las capas compactadas pero esponjosas del mantillo funcionan como un excelente aislante para el subsuelo helado. El permafrost de esas regiones alcanza una gran extensión y una edad de decenas de miles de años. Se prevé que, a finales de siglo, Alaska perderá el 25 por ciento de sus áreas de permafrost solo como consecuencia del calentamiento. Los incendios pueden acelerar el proceso. Cuando quedan menos de trece centímetros de mantillo aislante, el permafrost puede descongelarse y degradarse sustancialmente. En las latitudes medias de Alaska, los incendios pueden causar un deshielo lo bastante intenso como para que el permafrost nunca se recupere, a no ser que se produzca una nueva glaciación.

En 2007 se dio un caso extremo de deshielo inducido por el fuego cuando se produjo el incendio en la zona del río Anaktuvuk. Se quemaron más de 100.000 hectáreas de tundra de la región de North Slope, en el extremo septentrional de Alaska, a 70 grados de latitud. Los incendios producidos más allá del círculo polar ártico (67 grados de latitud) son infrecuentes; los investigadores no contaban con registros de un incendio tan severo en una latitud tan elevada. El fuego fue ocasionado por un rayo caído en julio. Aunque parecía haber quedado extinguido en agosto, continuó ardiendo silenciosamente en el mantillo, bajo la superficie sin árboles, y se reavivó durante un septiembre cálido. Las llamas dispersaron en una gran extensión espesas nubes de humo que asfixiaron a los residentes de pueblos distantes. Según unos cazadores indígenas, el humo había alterado las migraciones otoñales de los caribúes. Debido a unas condiciones otoñales extremadamente secas, el fuego alcanzó tal profundidad en las tierras afecta-

das por la sequía que continuó ardiendo hasta octubre, cuando los lagos se habían congelado y la nieve volvía a cubrir la región. Al final, quedaron afectadas más de 100.000 hectáreas de una gran extensión de permafrost.

Dada la extraordinaria magnitud del incendio, una de las autoras del presente artículo (Jandt) inició un estudio para el Servicio de Incendios Forestales de Alaska de la Oficina de Gestión Territorial sobre el efecto de la perturbación en la vegetación y la capa activa. A principios de julio de 2008, cuando empezaba el siguiente verano ártico, el equipo de investigación llegó en helicóptero a la zona del río Anaktuvuk. En esa época del año, la región de North Slope suele estar dominada por el frío, el viento y la llovizna. Por el contrario, el helicóptero aterrizó en una extensión de tierra calcinada bajo un despejado cielo azul. La temperatura llegó a alcanzar unos asombrosos 26,5 grados Celsius, demasiado altas para vestir pesados monos de vuelo y botas aislantes. Las condiciones eran tan cálidas y secas que las habituales hordas de mosquitos habían desaparecido y habían sido reemplazadas por nubes de moscas negras.

El equipo observó la formación de cúmulos como resultado del ascenso de masas de aire caliente, lo que puede originar tormentas eléctricas. Los habitantes del interior de Alaska están habituados a que el calor estival desencadene fuertes tormentas eléctricas, sobre todo en junio y julio, cuando el sol no se pone durante prácticamente las 24 horas del día. Los incendios provocados por rayos son responsables del 90 por ciento de las áreas quemadas de tundra y taiga en Alaska y Canadá. Pero en North Slope, los rayos eran excepcionales. Una anciana inupiat que había residido toda la vida en Utqiagvik (anteriormente conocida como Barrow) declaró que no había visto una tormenta desde 1992.

El cambio climático intensifica la caída de rayos en EE.UU., y las alteraciones más acusadas se observan en las latitudes más septentrionales. En un trabajo publicado en 2014, David Romps, de la Universidad de California en Berkeley, pronosticó que cada grado Celsius de calentamiento supondría un aumento del 12 por ciento en el número de rayos caídos en los estados contiguos. En un análisis publicado en 2019, Peter Bieniek, de la Universidad de Alaska en Fairbanks, informó de un aumento del 17 por ciento en el número de rayos en toda Alaska durante los últimos 30 años; en algunas regiones, la cifra alcanzaba un valor del 600 por ciento. Los modelos de Sander Veraverbeke, profesor de teledetección de la Universidad Libre de Ámsterdam, pronostican que, hacia 2050, Alaska experimentará un aumento del 59 por ciento en el número de rayos, lo que conllevará un incremento del 78 por ciento en los casos de incendios forestales provocados por rayos y un aumento en las áreas quemadas del 50 por ciento. Un estudio publicado en 2021 indicó que el número de rayos caídos en el Ártico se había triplicado entre 2010 y 2020.

La región ártica de Alaska ha experimentado un calentamiento mucho más acentuado que


El abeto negro predomina en los bosques de Alaska, pero si los incendios penetran en profundidad, podrían sustituirlo otros árboles de madera más dura, como el abedul y el álamo, con la consecuente alteración de los hábitats y los ecosistemas.

WORLDFOTO ALAMY STOCK PHOTO

cualquier otra parte del estado, un cambio que viene acompañado de una mayor oleada de rayos. Las temperaturas medias anuales en Utqiagvik aumentaron 6,3 grados Celsius entre 1976 y 2018, y las temperaturas otoñales se han elevado 10 grados.

Tierra de cambio

Los cambios que el equipo de investigación registró a lo largo de su recogida de datos, entre 2008 y 2018, en la zona del río Anaktuvuk, en North Slope, guardaban similitudes con los observados después de haberse producido un incendio severo en Alaska y en las latitudes boreales. Cada vez que el equipo exploró el área quemada, tomó datos de la cubierta vegetal e introdujo sondas metálicas en el suelo a lo largo de múltiples transectos para analizar la capa activa. La profundidad del suelo descongelado en la zona quemada, en comparación con la de la no quemada, aumentó anualmente: desde diez centímetros más un año después del incendio hasta 19 centímetros más al cabo de cuatro años. Diez años después, la capa activa mostró indicios de recuperación y de que, posiblemente, el deshielo había dejado de avanzar en profundidad.

Sin embargo, esos datos no reflejan la magnitud de las alteraciones superficiales producidas durante el incendio de la zona del río Anaktuvuk. A medida que el permafrost se deshelaba y el agua resultante se infiltraba, la capa de tierra más superficial se deslizaba y se agrietaba. Como consecuencia del volumen de permafrost en desintegración, comenzaron a hundirse, o a subsidir, grandes áreas de terreno. Desde el helicóptero, los vastos terrenos sin vegetación arbórea parecían un tablero de ajedrez de casillas de tierra; los oscuros canales, similares a grietas, que delimitaban cada casilla eran cada vez más profundos. Se abrieron cráteres de hasta 60 metros de diámetro en los que el deshielo desestabilizaba las laderas, un fenómeno conocido como colapso termokárstico. Las cuñas de hielo subterráneas que no habían visto el sol durante 60.000 años emergieron despidiendo un olor a dinosaurios muertos.

A fin de cartografiar los cambios producidos en el terreno, Ben Jones y Carson Baughman, expertos en teledetección y permafrost del Servicio de Inspección Geológica estadounidense, se incorporaron a las expediciones en 2017. Jones empleó un radar aéreo para confirmar que la subsidencia era generalizada y alcanzaba profundidades que oscilaban entre diez centímetros y un metro. En buena parte de la mitad oriental de la zona quemada, la rugosidad de la superficie, un indicador de la subsidencia, se había triplicado y generaba en el terreno canales más profundos, colinas más altas y un aumento del área superficial.

Jones y Baughman dejaron sondas instaladas tanto en áreas quemadas como no quemadas para continuar registrando temperaturas. Los datos demostraron que, a quince centímetros de profundidad, el suelo del área quemada se hallaba una media de 1,5 grados Celsius más caliente a lo largo del año que el suelo del área no quemada, y que las temperaturas máximas estivales eran 6,1 grados más elevadas. Obviamente, tal calentamiento pone en peligro el permafrost, pero también influye en la vegetación que en adelante dominará la región. Diez años después del incendio en la zona del río Anaktuvuk, había aumentado notablemente la población de arbustos altos, herbáceas y otras plantas vasculares, algunas de las cuales se consideraban poco comunes hasta entonces. En un suelo más cálido, las herbáceas de crecimiento rápido y los arbustos de sauce pueden competir con los musgos, los líquenes y los arbustos enanos de crecimiento más lento que predominaban antes del incendio. Los recién llegados agregan anualmente más restos secos al lecho de combustible que los musgos de crecimiento lento, lo cual podría explicar por qué en 2017, una década después del incendio en el río Anaktuvuk, se observaran dos nuevas cicatrices en el terreno, de unas 40 hectáreas cada una, dentro de la extensión quemada de 2007. La repetición de un incendio en tan solo 10 años se consideraba inusual en el interior de un área quemada, donde el período de recurrencia estimado entre dos incendios consecutivos es de varios centenares de años.

¿Sumidero o fuente?

Los investigadores se afanan por comprender las repercusiones de los cambios que se observan en los incendios de las regiones boreales. Las más inmediatas, como las emisiones de gases de efecto invernadero, la peor calidad del aire y los daños en las infraestructuras, resultan obvias. Sin embargo, los posibles efectos secundarios son difíciles de predecir. Entre ellos se espera un calentamiento estival del suelo

como resultado de la superficie negra carbonizada, la ondulación del terreno y la regeneración de la vegetación a medida que las plantas rebrotan o vuelven a dispersar sus semillas. La sección del suelo que se deshiela de forma estacional puede alcanzar una mayor profundidad y el permafrost, de existir, puede verse reducido. Las zonas bajas pueden humedecerse temporalmente durante el deshielo, lo que permite la proliferación de herbáceas, arbustos y árboles caducifolios.

Sin embargo, con el paso del tiempo, la mayor abundancia de arbustos en la tundra puede acentuar el calentamiento del suelo. Por un lado, los arbustos retienen más nieve, lo que aísla el suelo del aire más frío. Las pendientes y las lomas quemadas pueden secarse más a medida que el deshielo profundiza, lo que causa un mayor drenaje subsuperficial; las nuevas técnicas de detección han revelado la presencia de «taliks» (regiones de suelo no congelado) en profundidad bajo las áreas quemadas, lo que configura canales de deshielo en el permafrost. Los cambios en el hábitat y en la cubierta arbórea de la taiga alteran los patrones migratorios de los animales. Y, en los suelos más cálidos, los microbios del mantillo y el permafrost descongelado digieren más carbono antiguo y lo transforman en gases de efecto invernadero, como el metano.

El mayor número de incendios en las regiones de taiga y tundra, y los consiguientes cambios en los ecosistemas, tienen repercusiones que solo los grandes modelos informáticos son capaces de estimar. Tales modelos predicen que los incendios boreales pueden duplicarse o incluso cuadriplicarse a fines de siglo, con la consiguiente liberación de ingentes cantidades de carbono procedente del omnipresente mantillo. En consecuencia, la región podría dejar de ser un sumidero de carbono para convertirse en una fuente, lo que amplificaría el cambio climático en todo el mundo.

Pero puede que no todo sean malas noticias. Algunos estudios indican que una transición en la composición del bosque, desde uno dominado por coníferas, como el abeto, hasta otro con caducifolios menos inflamables, como el abedul y el álamo, podría contrarrestar en parte el aumento previsto de las áreas quemadas; más aún si a ello se suma un ligero aumento de las lluvias atribuido a un menor volumen de hielo marino. Si tras los incendios los bosques caducifolios reemplazan a los de coníferas, podrían reflejar más luz solar, al menos en invierno, cuando pierden sus hojas; la luz reflejada por la nieve superficial moderaría la retroalimentación del calentamiento climático. Los suelos de tundra más cálidos ya están produciendo más arbustos y, en última instancia, podrían alojar árboles, que secuestrarían en su madera parte del carbono que pierden los suelos y el permafrost. Pero el problema reside en los detalles. Necesitamos mejores estimaciones de cada uno de esos factores para predecir cómo evolucionarán los mecanismos de retroalimentación.

Mientras los científicos trabajan en ello, los habitantes de Alaska y los servicios antiincendios diseñan estrategias para proteger a la población, las tierras privadas, las infraestructuras y los recursos naturales en un medio donde los incendios son cada vez más intensos. Además, se preparan para combatir mejor las llamas mediante la reducción de los bosques o la eliminación de la maleza y la vegetación inflamable alrededor de pueblos y cabañas. También aprovechan nuevas técnicas, como las imágenes de satélite, para detectar con rapidez los incendios, así como para cartografiarlos y seguir su evolución con mayor precisión. Una mayor recurrencia de incendios en las regiones boreales puede alterar la tierra y el clima, pero los habitantes de Alaska tratan de hacer todo lo posible para prevenir desastrosas pérdidas de vidas y bienes.

Randi Jandt es ecóloga especializada en incendios, bióloga y bombera ocasional del Centro Internacional de Investigaciones Árticas y el Consorcio Científico sobre Incendios de Alaska en la Universidad de Alaska, en Fairbanks.



Alison York es investigadora del Centro Internacional de Investigaciones Árticas y coordinadora del Consorcio Científico sobre Incendios de Alaska.



EN NUESTRO ARCHIVO

Calentamiento y vegetación ártica. Matthew Sturm en *IyC*, julio de 2010.
La predicción del permafrost. Ted Schuur en *IyC*, marzo de 2017.

LA BUJÍA DE LAVOISIER

Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik | Hace siglos que un experimento de física recreativa viene recibiendo repetidamente interpretaciones variadas. Sin embargo, hace 250 años Antoine Lavoisier dio la explicación correcta.

Colóquese una bujía encendida en un cuenco con el fondo lleno de agua. Cúbrasela con un recipiente grande de vidrio hasta que el borde se hunda bien en el agua. Tras unos segundos, la llama de la bujía se atenúa y luego se extingue, mientras que el agua es aspirada hacia el recipiente hasta llenar aproximadamente un quinto de su volumen (si hay agua suficiente). Para explicar este fenómeno suelen invocarse varias pistas: la desaparición del oxígeno del aire a causa de la combustión (una «explicación» muy extendida), la disolución del dióxido de carbono producido o, incluso, la disminución del volumen del aire caliente. Sin embargo, cuidadosos experimentos han confirmado la explicación debida al químico francés Antoine Lavoisier y descartado las otras: cuando se cubre la bujía con el recipiente, el aire caliente queda atrapado; al enfriarse cuando la bujía se apaga, ese aire se contrae, lo cual provoca el bombeo del agua.

El termoscopio, un experimento milenario

Retomemos la historia desde sus inicios, hace más de 2000 años. En efecto, las primeras noticias escritas del experimento datan del 300

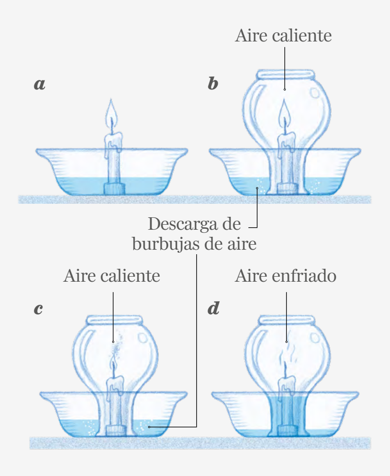


En el experimento de la bujía, así como en el del «termoscopio», es la contracción del aire, durante su enfriamiento, lo que explica el ascenso del agua.

ILUSTRACIONES DE BRUNO VACCARO

Dilatación seguida de compresión del aire

Cuando la bujía está encendida, el aire que la rodea se calienta y, por tanto, se dilata. A menos que el experimento se realice con cuidado, sumergiendo el recipiente invertido hasta una profundidad de agua suficiente, escaparán burbujas de aire (*b, c*). La cantidad de aire presente en el recipiente invertido se ve así reducida, y cuando ese aire se enfría tras apagarse la llama, su volumen disminuye (*d*).



antes de nuestra era. Filón de Bizancio, científico e ingeniero, lo describía en sus *Pneumatica*, y explicaba la reducción de volumen de los cuatro elementos (aire, agua, fuego y tierra). No obstante, Filón había comprendido que la dilatación y la contracción térmicas del aire se manifestaban en el «termoscopio», un aparato que presentaba el mismo efecto.

Ese instrumento consiste (en la versión que popularizó Galileo) en un frasco del tamaño de un huevo de gallina, provisto de un cuello muy largo y fino como una paja. Manteniéndolo entre las manos, el experimentador calienta el frasco y el aire que encierra; luego lo invierte y sumerge la abertura en agua. Cuando retira las manos y el frasco y el aire que contiene se enfrían, el agua asciende veloz por el cuello. Este fenómeno se explica hoy fácilmente sabiendo que una variación de 3 °C en la temperatura de un gas provoca una variación de volumen del orden del 1 % (en un medio a temperatura ambiente).

Respecto al experimento de la bujía, la explicación correcta nos la ofrece la *Memoria sobre la combustión de las candelas en el aire atmosférico y en el aire eminentemente respirable*, de Antoine Lavoisier. Dos brillantes frases la resumen: «Casi todos los que se ocupan de experimentar sobre la combustión de candelas o bujías están persuadidos de que tenía lugar una reducción considerable del volumen del aire durante la combustión. [...] Pero no se prestaba atención a que no puede colocarse un recipiente sobre una bujía sin que se caliente el aire del recipiente en el mismo instante en que se coloca sobre la bujía, y antes de que entre en contacto con la base: así pues, en la campana se confina aire caliente; ahora bien, ese aire caliente disminuye de volumen al enfriarse».

Escape de burbujas de aire

Lavoisier comprobó también que, a causa de su calentamiento por la llama de la bujía, el volumen del aire encerrado en la campana aumentaba antes de disminuir. Si nos limitamos a poner, sin más, un recipiente por encima de una bujía encendida en pie sobre un platillo, por ejemplo, ese aumento de volumen fuerza al aire a escapar mediante la formación de burbujas, visibles si nos fijamos bien.

Conclusión: si el experimento se realiza sin los cuidados debidos, no se controlarán realmente la cantidad de aire dentro del recipiente ni su temperatura. Para asegurar que el aire no se escape, basta con realizar el experimento en un recipiente profundo lleno con varios centímetros de agua, de tal modo que, cuando pongamos la campana boca abajo al meterla en el agua, quede sumergida en una altura de agua suficiente. Y para asegurar que el aire contenido en la campana esté a temperatura ambiente, se precisa que el volumen de aire esté cerrado antes de prender la mecha de la bujía.

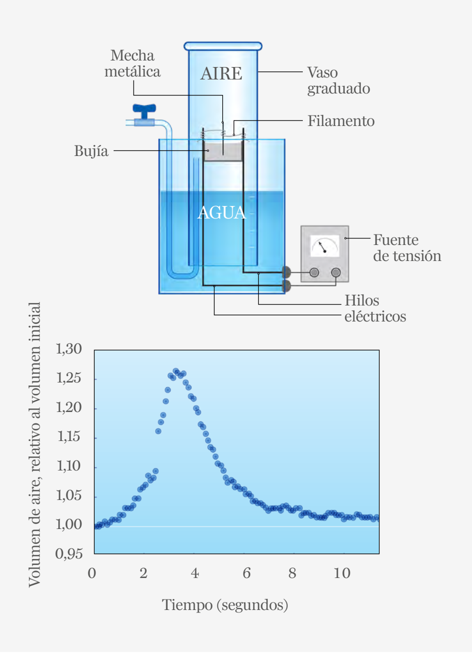
Eso es lo que hizo John Priestley, el competidor de Lavoisier: encerró en la campana inmersa en mercurio una bujía apagada, para luego prenderla con los rayos solares concentrados por una lente. Lavoisier se sirvió de una variante en la cual situaba junto a la mecha fósforo, que encendía con un hierro caliente que acercaba a través del mercurio.

En una versión más moderna del experimento, informada en 2011, Francisco Vera y dos colegas de la Universidad Católica de Valparaíso, la mecha se enciende merced a una corriente eléctrica que la atraviesa (*véase el recuadro «Un experimento concluyente»*). La conclusión es categórica: en esas condiciones, el volumen de aire varía menos de un 1 % entre el comienzo y el fin del experimento, como si nada hubiera pasado con el aire, salvo calentarse y dilatarse antes de recobrar la temperatura ambiente y su volumen inicial.

FUENTE: F. VERA ET AL., *SCIENCE & EDUCATION*, VOL. 20(9), PÁGS. 881-893, 2011.

Un experimento concluyente

En el experimento realizado por Francisco Vera y sus colaboradores, el recipiente cilíndrico se invierte y se hunde hasta una profundidad suficiente para impedir que el aire se escape (previamente se habrá abierto el grifo del pequeño tubo, para permitir el retorno parcial del agua al recipiente; luego se cierra). La mecha de la bujía es un tubo muy fino de acero inoxidable, y se enciende mediante una corriente eléctrica que pasa por un filamento metálico. Así, el volumen de aire permanece cerrado durante todo el experimento. En estas condiciones se comprueba que ese volumen primero aumenta (a causa del calentamiento del aire), para luego disminuir (por el enfriamiento) hasta recobrar prácticamente su valor inicial.



FUENTE: F. VERA ET AL., *SCIENCE & EDUCATION*, VOL. 20(9), PÁGS. 881-893, 2011.

La química complica las cosas

En ello hay algo que nos desorienta, pues se produce desde luego una reacción química: la combustión de la parafina de la bujía, que se vaporiza por el calor y reacciona con el oxígeno del aire. Esta transformación se escribe $C_{25}H_{52} + 38O_2 \rightarrow 25CO_2 + 26H_2O$, que nos indica que por cada 38 moléculas de oxígeno consumidas se producen 25 moléculas de gas carbónico y 26 de agua. Ahora bien, el oxígeno constituye, en volumen, el 21 % del aire atmosférico: si se consumiera todo durante la combustión de la llama —lo que, por cierto, sugiere la extinción de esta—, obtendríamos, por proporcionalidad, el 13,8 % (21 % x 25/38) del volumen inicial en forma de gas carbónico y un 14,4 % en forma de vapor de agua. Podemos considerar que todo el vapor de agua se condensa, pero ¿qué pasa con el dióxido de carbono? Experimentos complementarios muestran que su disolución en el agua es insignificante y que, por tanto, debería finalmente sufrir una reducción de volumen del 7 %. ¿Por qué no es este el caso?

Hemos supuesto que la reacción es completa. Ahora bien, cuando la llama se extingue, en realidad se ha consumido solo un 60 % del oxígeno. Se realizó un experimento cuantitativo con una hoja de papel, cuya masa se eligió de modo que su combustión completa requiriera exactamente la cantidad de oxígeno presente bajo la campana. De esa hoja ardió solo la mitad.

¿Por qué una combustión incompleta? Conforme avanza la combustión, disminuye la cantidad de oxígeno presente; ello lentifica la reacción y, por ende, la generación de calor. Llega un momento en que la temperatura de la llama y la cantidad de oxígeno disponible localmente no bastan para mantener la reacción, que se detiene por sí misma. Y eso es lo que observamos con la bujía.

En los primeros segundos, la llama es muy luminosa y la combustión es total. Luego disminuye la luminosidad y vemos humo negro; la combustión es incompleta: en ella se produce carbono en forma de hollín y, también, monóxido de carbono. Al final, la llama se extingue y un poco de parafina sigue evaporándose de la mecha caliente. Ese consumo solo parcial del oxígeno y la producción de monóxido de carbono (que necesita solo un átomo de oxígeno y no dos) explican por qué la reducción de volumen observada es muy inferior al 7 % previsto para una combustión completa. Pero cuando el experimento se efectúa sin precauciones, predomina el efecto térmico: una variación media de 60 °C en la temperatura del aire provoca la variación observada de un quinto de su volumen.

Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik son profesores de física en la Universidad de París-Sorbona.



PARA SABER MÁS

Mémoire sur la combustion des chandelles dans l'air atmosphérique, et dans l'air éminemment respirable. A. Lavoisier en *Mémoires de l'Académie des sciences*, pág. 195, 1777.

Paradoxes, puzzles, and pitfalls of incomplete combustion demonstrations. E. Vitz en *Journal of Chemical Education*, vol. 77(8), pág. 1011, 2000.

Burning a candle in a vessel, a simple experiment with a long history. F. Vera et al. en *Science & Education*, vol. 20(9), págs. 881-893, 2011.

LA LEY CUADRÁTICO-CÚBICA Y EL TAMAÑO DE LOS GIGANTES



FRED WIERUM/WIKIMEDIA COMMONS

Bartolo Luque | Un sencillo principio matemático impide la existencia de seres arbitrariamente grandes

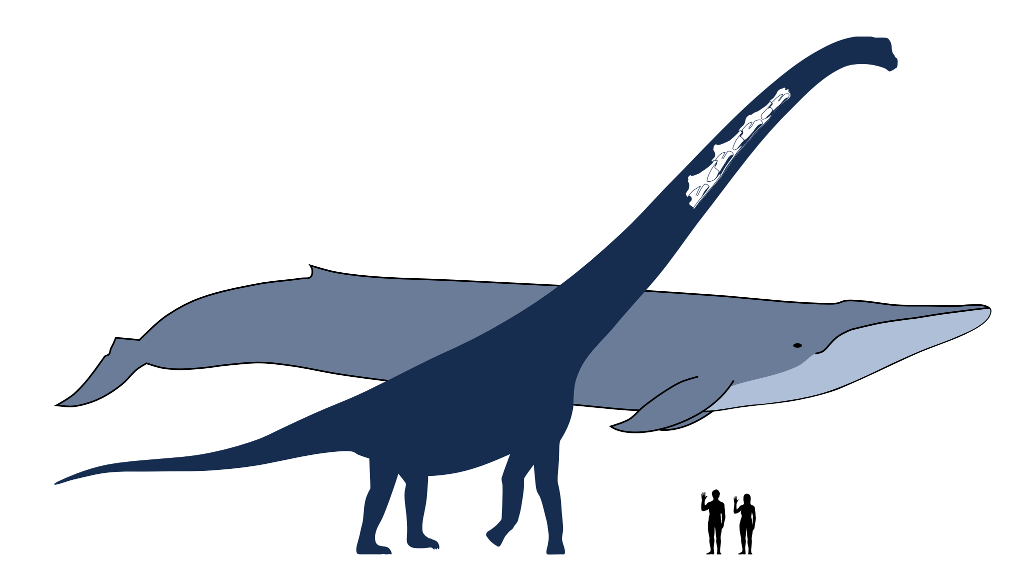
Sin duda, tienen razón los filósofos cuando nos dicen que nada es grande o pequeño si no es por comparación.

Jonathan Swift,
Los viajes de Gulliver (1726)

Hace unas semanas, mi hija pequeña estaba viendo una serie de anime titulada *Ataque a los titanes*. Le pregunté por las descomunales criaturas de aspecto humano que aparecían en ella y me aclaró que eran los «titanes», monstruos que se comían a la gente. «Algunos miden solo 3 metros, pero los más grandes pueden alcanzar ¡60 metros de altura!», añadió emocionada. Me pareció una buena oportunidad para ejercer de abuelo cebolleta y explicarle la ley cuadrático-cúbica, de modo que repliqué: «Eso es físicamente imposible porque...». No me permitió acabar la frase: «Ya, ya... ¿Me dejas seguir viendo la serie?» Así que, como tenía la sencilla y sorprendente explicación en la punta de la lengua, decidí plasmarla en esta columna.

Si nos fijamos en el peso de los organismos que habitan nuestro planeta, veremos que varía desde los 10^{-13} gramos de los micoplasmas, bacterias que carecen de pared celular, a las más de 100 toneladas de la ballena azul. Eso son ¡21 órdenes de magnitud! Al pensar en animales gigantescos, enseguida nos viene a la cabeza el diplodocus, que podía alcanzar casi 30 metros de longitud gracias a su cuello y cola enormes. Pero otros dinosaurios (como *Argentinosaurus*, con sus 100 toneladas; *Seismosaurus*, con sus 50 metros de largo; y *Sauroposeidon*, con unos 18 metros de alto) lo superaron con holgura. Son tamaños y pesos que empequeñecen a los animales terrestres actuales: el más alto, la jirafa, se eleva poco más de 5 metros, y el más pesado, el elefante africano, no pasa de 12 toneladas.

¿Hay algún motivo para que no existan ni hayan existido animales aún más grandes? El peso es el principal sospechoso, más aún si nos percatamos de que, en los océanos, los animales alcanzan dimensiones mayores. El pez actual de mayor tamaño es el tiburón ballena,



Comparación entre los tamaños aproximados del ser humano, la ballena azul y *Sauroposeidon proteles,* uno de los dinosaurios más altos conocidos (se muestran las cuatro vértebras cervicales que condujeron al descubrimiento de la especie). La ley cuadrático-cúbica explica por qué no han existido animales mucho más grandes que estos.

STEVEOC 86/WIKIMEDIA COMMONS (*dinosaurio y personas*); KURZON/WIKIMEDIA COMMONS (*ballena*)

que llega a 12 metros de longitud. Lo supera el calamar gigante, que puede rebasar los 15 metros. Pero el récord, con un máximo conocido de 33 metros y 180 toneladas, lo ostenta la ballena azul. Atendiendo a su masa corporal, este cetáceo es el mayor animal que jamás ha existido. Y el hecho de que los seres más pesados de la historia de la biosfera sean marinos se debe al principio de Arquímedes: en el agua, los cuerpos experimentan un empuje que compensa la fuerza de la gravedad.

La ley cuadrático-cúbica

Todo apunta a que la gravedad actúa como un factor limitante del tamaño de los organismos. Pero ¿por qué? En tiempos de Galileo Galilei (1564-1642) se sabía que algunas grandes máquinas, que eran copias a escala de otras más pequeñas y muy eficaces, tendían a fallar. Resulta que ese «problema de la escala» se debía a la ley cuadrático-cúbica, descubierta por Galileo en 1638 y que podemos enunciar así:

Cuando un objeto crece sin cambiar de forma, su superficie aumenta como el cuadrado de alguna longitud característica (por ejemplo, su altura), mientras que su volumen crece como el cubo de dicha cantidad.

Así, un cubo de L metros de arista tiene una superficie de $6L^2$ metros cuadrados y un volumen de L^3 metros cúbicos, de modo que su superficie crece con el cuadrado de L y su volumen lo hace con el cubo de esa longitud.

¿Qué nos dice esa ley sobre el tamaño de los seres vivos? Algunas propiedades físicas de un cuerpo dependen de su superficie, y otras, de su volumen. Según la ley cuadrático-cúbica, si aumentamos el tamaño de un objeto manteniendo sus proporciones, las características dependientes del volumen crecerán más deprisa que las asociadas a la superficie, lo cual puede resultar fatal para un organismo.

Por ejemplo, el peso de cualquier cuerpo es proporcional a su volumen. Así, si duplicamos el tamaño de una manzana, su peso aumentará ocho veces. Sin embargo, como la resistencia del pedúnculo que une la fruta al árbol es proporcional a su sección transversal, se incrementará solo cuatro veces. Por eso las manzanas cuelgan de los árboles y las sandías crecen en el suelo.

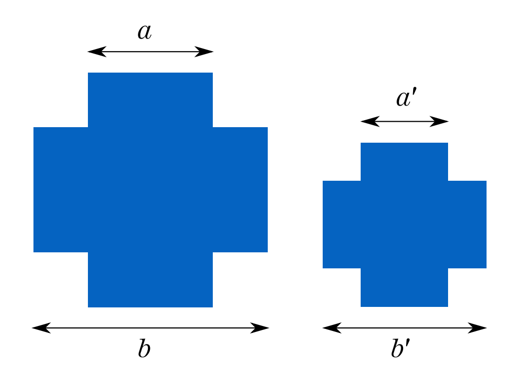
Colosos de ciencia ficción

Los gigantes siempre han azuzado nuestra imaginación. La literatura universal nos ofrece muchos ejemplos ilustres, como el Gargantúa de Rabelais, el Micromegas de Voltaire o el Gulliver de Swift. Pero el arte que más ha explotado el filón de lo mastodóntico es, sin duda, el cine y, para más señas, el cine de ciencia ficción.

El éxito que cosechó en 1933 la película *King Kong*, de la que todavía se ruedan versiones y secuelas, allanó el camino para que en los años cincuenta surgieran multitud de largometrajes donde cualquier animal o persona era susceptible de adquirir dimensiones descomunales por

efecto de la radiación nuclear. A la luz de la ley cuadrático-cúbica, ¿sería viable que existieran tales gigantes en nuestro planeta?

Veámoslo. Dadas dos figuras semejantes:



el cociente entre las longitudes de dos segmentos homólogos cualesquiera es una constante conocida como factor de escala *f*. Así, en la imagen anterior, el factor de escala sería $f = a'/a = b'/b$. Tomemos ahora un par de ejemplos célebres del cine de gigantes: el coronel Glenn Manning, protagonista de *El asombroso hombre creciente* (1957), y Nancy, de *El ataque de la mujer de 50 pies* (1958). La radiación hizo que ambos crecieran desde una altura normal de unos 1,75 metros hasta más de 15 metros, llevando al límite la elasticidad de la ropa interior. Para estos personajes, por tanto, hablaríamos de un factor de escala $f = 15/1{,}75 = 8{,}57$. Si suponemos un peso original de 80 kilogramos, tales gigantes pesarían $80 \times 8{,}57^3$ kilos, o unas 50 toneladas. ¿Representa eso un problema?

Pensemos en las plantas de sus pies. Su superficie solo habría aumentado $8{,}57^2$ veces, de modo que soportarían una presión (un peso por unidad de superficie) 8,57 veces mayor. Y, conforme aumenta el tamaño de estos gigantescos seres, la cosa no hace sino empeorar. En el caso de los titanes de 60 metros de altura que apasionaban a mi hija, estaríamos ante un factor de escala $f = 60/1{,}75 = 34{,}28$, así que deberían soportar presiones casi 35 veces superiores a las que experimenta un ser humano. Y eso implica algo más que un tremendo dolor de pies.

Igual que ocurre con los pedúnculos de las manzanas, la resistencia de los huesos a la compresión aumenta con la superficie de su sección transversal: es decir, de manera cuadrática y mucho más despacio que el peso. La evolución ha compensado hasta cierto punto esta discrepancia ensanchando los huesos de las patas de los grandes mamíferos. (Pensemos en las gruesas extremidades de los elefantes y el extraño efecto que producen los elefantes con patas de jirafa de Dalí.) Además, la selección natural parece haber establecido un factor de seguridad de 10 para la resistencia de los huesos, un margen necesario si tenemos en cuenta que el máximo estrés no lo soportan en situación estática, sino durante las aceleraciones y desaceleraciones asociadas al movimiento. Pero 10 no es 35, así que nuestros esbeltos titanes en realidad tienen los pies de barro y se partirían al mínimo movimiento.

El tamaño sí que importa

En relación con lo que acabamos de exponer, Galileo comentaba lo siguiente:

Si se quisiera mantener en un gigante la misma proporción de miembros de un hombre normal, o bien sería necesario utilizar un material más duro y fuerte para formar sus huesos, o habría que admitir una disminución de su resistencia en comparación con la de un hombre de estatura media.

Quizás nuestros colosos podrían ser mecánicamente funcionales si ensancharan lo bastante sus huesos (aunque mucho me temo que los de los titanes tendrían que ser de acero o titanio). El problema es que el tamaño de un organismo afecta de una manera crucial y compleja tanto a su estructura como a sus funciones. Aun si nuestros gigantes engrosaran su osamenta hasta la deformidad o sustituyeran el calcio por titanio, seguirían adoleciendo de toda una serie de problemas insoslayables debidos a su tamaño.

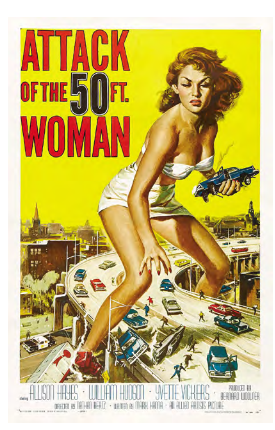
Uno notable tiene que ver con la fuerza muscular. Recuerdo que, con la edad de mi hija, me encandiló la película *La humanidad en peligro* (*Them!*, 1954), en la que unas hormigas alcanzaban tamaños de 10 metros, una vez más a causa de la radiación de unas pruebas nucleares. Suponiendo que las hormigas originales medían alrededor de 1 centímetro, estaríamos frente a un factor de escala de $10/0{,}01 = 1000$. Así pues, el peso de los insectos se incrementaría 10^9 veces, pero el área transversal de sus músculos solo 10^6 veces, es decir, 1000 veces menos.

Ahora bien, la fuerza relativa de un organismo se define como el cociente entre el peso que puede levantar (que depende, precisamente, del área transversal de sus músculos) y su propio peso. Así, los seres humanos tenemos una fuerza relativa cercana a 1 —somos capaces de levantar más o menos nuestro propio peso—, y las hormi-









WIKIMEDIA COMMONS/DOMINIO PÚBLICO

El éxito cosechado por *King Kong* en 1933 condujo al rodaje en los años cincuenta de toda una serie de películas con criaturas gigantes. Aquí se muestran los carteles de *Godzilla* (1954), *El monstruo alado* (1957) y *El ataque de la mujer de 50 pies* (1958).

gas, de aproximadamente 3. Pero, según la discusión del párrafo anterior, nuestras hormigas radiactivas pasarían a tener una fuerza relativa de 3/1000 y no podrían realizar movimiento alguno: serían hormigas mutantes inválidas.

Las criaturas gigantes voladoras presentan limitaciones de diseño similares, pues no preservarían una relación óptima entre la superficie de las alas y el peso. Y aquellas sin capacidad de vuelo también se enfrentarían a serios problemas relacionados con el peso en caso de sufrir una caída. Como ilustraba (con un toque gore) el biólogo John B. S. Haldane en 1926:

Si arrojamos un ratón a un pozo de 900 metros, al llegar al fondo sufrirá un ligero golpe y saldrá corriendo, siempre que el suelo sea lo bastante blando. Una rata se matará, un hombre se descoyuntará y un caballo reventará.

Tales diferencias se deben a la distinta energía cinética (la cual aumenta con el peso) y superficie de resistencia al aire que presentan cada uno de esos animales durante su caída.

A tenor de todo lo que hemos visto, no hay duda de que, a lo largo de la evolución, la fuerza gravitatoria ha influido en los sistemas musculoesqueléticos. Pero también ha debido hacerlo en muchos otros, que plantean nuevos retos para la viabilidad de los seres descomunales. Tomemos como ejemplo los sistemas de distribución de líquidos. Las secuoyas gigantes, enormes árboles que alcanzan alturas superiores a los 100 metros, consiguen la extraordinaria proeza de impulsar sus fluidos vitales hasta las ramas superiores. Pero los animales están mucho más limitados: la distancia entre el corazón y el cerebro de una jirafa es de unos 2,8 metros, y el récord se sitúa en los casi 8 metros de algunos dinosaurios herbívoros. Semejante distancia debía requerir enormes presiones para que la sangre llegara al cerebro, así que nuestros gigantes de corazones escalados seguramente se desmayarían al alcanzar cierto tamaño.

La lista de dificultades que debería afrontar un organismo gigante es interminable: ¿cómo lograría proporcionar oxígeno a cada una de sus células? (La capacidad de absorción de oxígeno de los pulmones es proporcional a su superficie.) ¿Serían capaces sus riñones de filtrar toda la sangre que corre por sus venas? ¿Cuál sería su tasa metabólica? ¿Cómo disiparía su calor interno?... Así que «el tamaño sí que importa».

En fin, pues esto era lo que quería explicarle a mi hija pequeña. Espero tener otra oportunidad si la encuentro viendo los Pitufos, porque, si ser grande acarrea problemas, ser demasiado pequeño tampoco está exento de ellos. Ahora que conoce la ley cuadrático-cúbica, ¿se le ocurren algunos de los inconvenientes que conllevaría convertirse en el increíble hombre menguante?

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.



PARA SABER MÁS

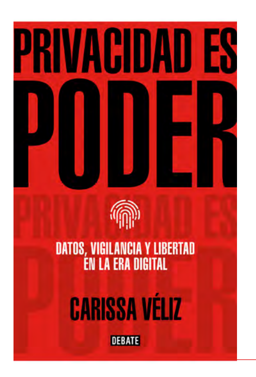
On being the right size. John B. S. Haldane en *Harper's Magazine*, marzo de 1926.
Tamaño y vida. Thomas A. McMahon y John Tyler Bonner. Prensa Científica, 1986.
Diálogos acerca de dos nuevas ciencias. Galileo Galilei (1638). Losada, 2004.
La ciencia de la ciencia ficción: Cuando Hawking jugaba al póker en el Enterprise. Manuel Moreno Lupiáñez y Jordi José Pont. Shackleton Books, 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

De visita en el país de Liliput. Norbert Treitz en *IyC*, septiembre de 2011.

EDUCAR EN LA ÉTICA DE LA PRIVACIDAD

O cómo sobrevivir en el salvaje Oeste digital



Privacidad es poder
Datos, vigilancia y libertad en la era digital
Carissa Véliz
Debate, 2021

Navegar por Internet es, paradójicamente, un acto solitario lleno de público. Porque estamos solos ante la pantalla, mientras hay muchos al otro lado. Es la falsa sensación de una compañía intangible: quizá llega una voz, una imagen o un texto y, sin embargo, el contacto físico es imposible. La privacidad absoluta también: la Red es pública y la seguridad de las transacciones de información, limitadas.

No obstante, no deambulamos solos, sino algo peor: mal acompañados. Porque, como destapa la filósofa mexicana Carissa Véliz en *Privacidad es poder*, en el tórrido desierto digital acechan los buitres de datos. Merodean y picotean lo que pueden. No nos matan, porque les interesamos vivos. Parasitan nuestras vidas, pues se nutren de la información que les suministramos. Cambiamos nuestros planes y experiencias personales, y cedemos manipulados a sus ofertas, influidos por estímulos diseñados para captarnos. Y, sin duda, se lucran a costa de nuestra intimidad, de los mal llamados «datos personales», pues, en realidad, siempre influyen a nuestros contactos estrechos; datos que, además, son regalados o vendidos a precio de saldo. Pero, no se engañen, no solo en las pantallas acecha la absorción de nuestra privacidad: ¿o no nos vendemos baratos con las llamadas tarjetas de fidelización de los comercios, por unos descuentos irrisorios?

Como les sucedió a los pioneros del lejano Oeste, en ausencia de control y de legislación impera la ley del gatillo fácil, ahora el golpe de clic. Proliferan los *sheriffs* autocráticos impuestos por las grandes corporaciones, que han cambiado la fiebre del oro por la minería de datos, el nuevo El Dorado. El relato de Véliz expone cómo nos vigilan, cómo nos han ido arrebatando nuestros datos, hemos perdido privacidad y, en consecuencia, disminuido nuestra autonomía personal, es decir, la capacidad de decidir libremente qué es importante para nosotros y a qué dedicamos nuestro tiempo y nuestro dinero.

Véliz atrapa al lector con un relato inicial asfixiante —por verosímil y cotidiano—, el de la muerte anunciada de nuestra privacidad y su conexión con el poder. Se respira la atmósfera del confinamiento en sus palabras, momento en el que reconoce haber escrito la primera edición en inglés, con una prosa ágil más propia de la novela que del ensayo, en un territorio intersticial que posteriormente han explorado autores como Jorge Carrión en *Membrana* (Galaxia Gutenberg, 2021), pero situando al lector como protagonista de la trama, en su relación con la tecnología. Con lucidez preclara afirma Véliz: «El poder de pronosticar e influir que se deriva de los datos personales es el poder por antonomasia de la era digital». ¿Fue una decisión libre aquella compra en línea, tras ver aquel anuncio sugerido? ¿Por qué nos enganchamos al móvil, o a los juegos en línea, en lugar de realizar otras actividades en el mundo?

Hay, por una parte, una crisis de realidad, de la atención, que afecta especialmente a los niños, que ya pormenorizó en el plano educativo Catherine L'Ecuyer en *Educar en la realidad* (Plataforma Editorial, 2015). Se nada incluso a contracorriente de las investigaciones científicas, cuando se potencian los libros electrónicos en las escuelas, aunque la lectura en papel sea pedagógicamente mejor

que en pantalla [*véase* «La lectura digital, en desventaja», por Pablo Delgado, Ladislao Salmerón y Cristina Vargas en *Mente y Cerebro*, n.º 99, 2019]. Lo tangible parece estar de capa caída.

Por otra parte, como desmenuzó Adam Alter en *Irresistible: ¿quién nos ha convertido en yonquis tecnológicos?* (Paidós, 2018), el diseño de experiencias adictivas y *facilitadoras* de nuestro día a día es la base del lucrativo negocio de las grandes empresas tecnológicas. Y lo peor de todo es que pensamos que sus principales servicios (buscadores, geolocalización, juegos, etcétera) son gratis. Las aplicaciones digitales facilitan la vida y nos sirven. Son útiles, por supuesto, pero ¿qué facilitamos nosotros a cambio y a quién servimos? ¿Conocemos la transacción que realizamos? ¿Por qué no está claro qué se llevan las grandes tecnológicas? Somos los siervos de la gleba digital: quizás en el futuro cambiarán los dueños del terruño tecnológico, subirán unas compañías y bajarán otras, pero allí permanecerán sus siervos, sus suministradores de datos.

Véliz llama a las cosas por su nombre desde el primer momento: ¿por qué denominar *cookies* a los «programas espía» de las compañías? ¿Daríamos alegremente el consentimiento para activar «programas espía»? ¡No son galletitas! ¿Por qué no actúan los Estados y organismos supranacionales de forma más contundente con la depredación de datos de los oligopolios digitales? La neolengua y el doblepensamiento se han apoderado del contexto semiótico digital.

Quizá se aceptan las *cookies* por cansancio y dejadez, pues el algoritmo de la máquina solicitándolo no se cansa, pero nosotros sí. Pero también se aceptan por ignorancia de las consecuencias de nuestro efímero acto o, simplemente, porque estamos distraídos jugando, en un entorno en apariencia inofensivo. Como expuso Walter Lippmann en el clásico *Public opinion* (1922), en los momentos de relajo bajamos la guardia y son por ello ideales para lograr que la propaganda cuaje en la opinión pública, o para conseguir, en este caso, el ansiado clic que legitime la grotesca venta de nuestra alma digital.

Cien años después de *Liberty and the news* (1920), es curioso que los ecos de Lippmann sigan tan vigentes, salvando las distancias tecnológicas, también en el papel de los medios en la propagación de bulos, de noticias falsas. En una actualización periodística del mito de la caverna platónico, Lippmann contraponía el mundo exterior a las imágenes que generamos de él en nuestra cabeza. La crisis digital se aleja en sus causas de la de hace un siglo, tras la Primera Guerra Mundial, pero posee un fondo común: hay grandes empresas que se están beneficiando de ella, en general a costa de la destrucción de las libertades individuales y de los derechos sociales. Las crisis siempre afectan a los mismos. La muerte del desamparado en el desierto es el festín de los buitres.

El ensayo de Véliz defiende la toxicidad de los datos y alerta del peligro inminente de su mal uso. Véliz insiste sobre el daño que pueden llegar a causar los datos que nos arrebatan, recordando evidencias pasadas como los casos de *Cambridge Analytica* o *Ashley Madison*. Los datos, indefectiblemente, nos pueden perjudicar en algún momento. Asusta.

Por fortuna, como Belle Starr en el *Far West*, Véliz no solo dispara con acierto a los buitres y a los forajidos de datos, sino que ayuda al lector a armarse para que pueda defenderse, partiendo de dos consideraciones clave: (1) las decisiones de hoy marcarán el grado de privacidad y la libertad con la que contaremos en el futuro, y (2) debemos sobreponernos a la comodidad de regalar nuestros datos (por ejemplo aceptando sin reparo todas las *cookies*), teniendo presente que la privacidad es algo colectivo y que, por tanto, de nuestras decisiones individuales dependerá la privacidad de nuestra familia, amigos o vecinos. Reducir lo que compartimos en redes sociales, respetar la privacidad de los demás (no etiquetando en fotos, por ejemplo), exigir y aumentar la privacidad, o promover el uso de DuckDuckGo como buscador, o Signal como sistema de mensajería, son solo algunas de las balas que nos suministra Véliz. Aprovéchenlas.

¿Y quién no necesita armarse? *Privacidad es poder* es un manifiesto de lectura imprescindible en los tiempos que corren. Véliz nos recuerda que el fomento del individualismo digital es otra estratagema de control social. Juntos somos más fuertes, más poderosos. Contra la vigilancia, internautas del mundo, uníos.

Antoni Hernández-Fernández
Universidad Politécnica de Cataluña